

# **Automaattinen visuaalinen tarkastus liikeantureille**

**Ilmari Harilainen**

**Sähkötekniikan korkeakoulu**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 4.4.2017.

**Työn valvoja:**

Prof. Erkki Ikonen

**Työn ohjaaja:**

FT Birgit Päivänranta

Tekijä: Ilmari Harilainen

Työn nimi: Automaattinen visuaalinen tarkastus liikeantureille

Päivämäärä: 4.4.2017

Kieli: Suomi

Sivumäärä: 7+65

Sähkötekniikan korkeakoulu

Professuuri: Mittaustekniikka

Työn valvoja: Prof. Erkki Ikonen

Työn ohjaaja: FT Birgit Päivänranta

Tämän opinnäytteen tavoitteena oli toteuttaa mittausjärjestelmän analyysi uudelle automatisoidulle visuaaliselle tarkastusjärjestelmälle. Tarkoituksena oli lisäksi selvittää, mitkä parametrit olivat kriittisimpiä järjestelmän toiminnan kannalta.

Kirjallisuusosassa selvitetään laaja-alaisesti eri tekijöitä, joilla on suuri merkitys optisten systeemien toiminnan kannalta. Vaikuttavista tekijöistä pyritään rajaamaan nimenomaan Murata Electronics Oy:ssä käytettyjen optisten mittalaitteiden ja niillä tutkittavien tuotteiden kannalta oleelliset. Lisäksi perehdytään tuotteen visuaalisen ulkomuodon kannalta tärkeimpiin prosessivaiheisiin.

Työn kokeellisessa osassa esitellään mittalaitteanalyysin ja laitteen pitkäaikaisen seurannan aikana tehdyt oleelliset havainnot. Lisäksi uuden laitteen kyvykkyyttä elementtien tarkastuksiin arvioidaan vertailemalla sitä vanhempiin mittalaitteisiin.

Kokeellisen osuuden perusteella todettiin, että laitteen ominaisuudet stabiilisuutta lukuunottamatta olivat kiitettävällä tasolla. Yhteenvedossa esitettiin toimenpideehdotukset stabiilisuuden saattamiseksi riittävälle tasolle.

Avainsanat: Optinen, visuaalinen, tarkastus, anturielementti, MEMS, luotettavuus

Author: Ilmari Harilainen

Title: Automatic visual inspection for motion sensors

Date: 4.4.2017

Language: Finnish

Number of pages: 7+65

School of Electrical Engineering

Professorship: Measurement Science and Technology

Supervisor: Prof. Erkki Ikonen

Advisor: PhD Birgit Päivänranta

The purpose of this thesis was to execute measurement system analysis for a new visual inspection tool. Additionally, the most crucial parameters for the stability of the inspection tool were specified.

In the literature part research was made on the factors that are most important for optical systems. The section focused on factors that are most relevant for the equipment used at Murata Electronics. Also, the most relevant processing steps and morphological factors for the products visual appearance are analysed.

The experimental section presents the results obtained from the measurement system analysis and the long term monitoring results. Additionally, the capability of the new inspection device is compared to the older tools.

Experimental results show that the tool capability is at excellent level, expect for the stability. Thus, the final conclusion chapter proposes actions for improving the tool stability.

Keywords: Optical, visual, inspection, sensor, element, MEMS, reliability

## Esipuhe

Tämä työ toteutettiin Murata Electronics Oy:lle osana laitehankintaprojektia. Työni mahdollistamisessa aiheen valitsemisen suhteen haluaisin kiittää Harri Hyppöstä, Jari Arstilaa sekä ohjaajaani Birgit Päivänrantaa. Lisäksi olen erittäin kiitollinen Birgitin tarjoamasta joustavuudesta ja tuesta, jota sain opinnäytteen ja muiden työtehtävien kanssa tasapainoillessani. Työtoverini Elina Halonen, Konsta Hannula, Matti Penttinen ja Mici Lindblom ansaitsevat erityiskiitokset antamastaan tuesta työn kokeellisen osion valmistelussa. Kiitokset myös valvojalleni Erkki Ikoselle työstä saamistani kommentteista ja tuesta.

Haluan kiittää myös rakasta vaimoani Saraa, jolta olen saanut kannustusta ja tukea läpi opinnäytteen ja opiskelujeni ajan. Kiitos myös vanhemmilleni Arsille ja Annelle, sekä veljelleni Laurille perheineen, jotka ovat toimineet esikuvini omalla ahkeruudellaan. Kiitos myös pian tulevalle tyttärelleni, joka antoi opinnäytteen viimeistelyyn loppusysäyksen.

Helsinki, 21.3.2017

Ilmari Harilainen



# Sisällysluettelo

<b>Tiivistelmä</b>	<b>ii</b>
<b>Tiivistelmä (englanniksi)</b>	<b>iii</b>
<b>Esipuhe</b>	<b>iv</b>
<b>Sisällysluettelo</b>	<b>v</b>
<b>Symbolit ja lyhenteet</b>	<b>vii</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2 Automatisoitu visuaalinen tarkistus</b>	<b>2</b>
2.1 Optiikka . . . . .	4
2.1.1 Sähkömagneettinen säteily kahden aineen rajapinnassa . . . .	5
2.1.2 Linssit . . . . .	6
2.1.3 Kuvan terävyys ja aberraatiot . . . . .	8
2.2 Valaistus ja valonlähteet . . . . .	10
2.2.1 LED-valonlähteet . . . . .	10
2.2.2 Purkauslamput . . . . .	12
2.2.3 Valaistusmenetelmät . . . . .	14
2.3 Suodattimet . . . . .	16
2.4 Sensorit . . . . .	17
2.4.1 CCD . . . . .	18
2.4.2 TDI-kuvantaminen . . . . .	20
2.4.3 CMOS . . . . .	20
2.4.4 Värikamera . . . . .	21
2.5 Tarkastusalgoritmit . . . . .	22
<b>3 MEMS-anturit</b>	<b>26</b>
3.1 Anturien mittausperiaate ja lopputuotteet . . . . .	26
3.2 Elementtivalmistus . . . . .	28
3.2.1 Sahaus . . . . .	29
3.2.2 Höyrystys metallointimenetelmänä . . . . .	32
3.2.3 Defektien vaikutus kokoonpanoon . . . . .	34
3.3 Anturien visuaalinen tarkastus MFI:llä . . . . .	35
3.3.1 AVI . . . . .	36
3.3.2 CAVI . . . . .	38
<b>4 Prosessin kontrollointi</b>	<b>42</b>
4.1 Prosessin kyvykkyys . . . . .	43
4.2 Mittaussysteemin analyysi . . . . .	45

<b>5 Tulokset</b>	<b>48</b>
5.1 CAVI stabiilisuus- ja mittalaiteanalyysi . . . . .	48
5.1.1 Bias ja lineaarisuus . . . . .	49
5.1.2 Stabiilisuus . . . . .	51
5.2 AVI:n ja CAVI:n kyvykkyysanalyysi . . . . .	56
<b>6 Yhteenveto ja jatkotoimenpiteet</b>	<b>59</b>

# Symbolit ja lyhenteet

## Lyhenteet

AOI	Automated Optical Inspection
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
ANOVA	Analysis Of Variance
AVI	Automated Visual Inspection
CAVI	Chip Automated Visual Inspection
CCD	Charge Coupled Device
CSOI	Cavity Silicon-On-Insulator
ESD	Electrostatic Discharge
FA	False Alarm rate
FL	Front Light
FMEA	Failure Methods and Effects Analysis
GAGE R& R	Gage Repeatability and Reproducibility
LED	Light Emitting Diode
VI	Virtual Instrument
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System
MFI	Murata Finland
MR	Miss Rate
MSA	Measurement System Analysis
PPM	Parts Per Million
RF	Red Filter
RGB	Red Green Blue
SAM	Surface Acoustic Microscopy
SPC	Statistical Process Control
TDI	Time Delay Integration
UCL/LCL	Upper/Lower Control Limit
USL/LSL	Upper/Lower Specification Limit
WAVI	Wafer Automated Visual Inspection

# 1 Johdanto

MFI:llä (Murata Electronics Oy) valmistetaan piikiekoille puolijohdeprosessien avulla MEMS-elementtejä (Micro-Electro-Mechanical System). Elementit tarkastetaan sähköisesti ja visuaalisesti ennen edistämistä seuraaviin prosessivaiheisiin. Korkean luotettavuuden omaavan elektroniikan valmistuksessa visuaalinen tarkastus on erittäin merkittävässä osassa tuotantoprosessien kontrolloinnissa. Sillä saadaan suoraa palautetta prosessista sekä sen avulla hylätään viallisia elementtejä kiekolta tai kokonaisia kiekkoja, jotka voisivat muodostaa laaturiskin asiakkaalle. Visuaalista tarkastusta varten markkinoilla on tarjolla useita laitteita, sillä ihmisen suorittama tarkastus on suhteellisen epäluotettava sekä taloudellisesti kestäväntöytä suurilla tuotantomäärillä.

Diplomityön alkuvaiheessa tämä visuaalinen tarkastus suoritettiin vanhoilla kustomoiduilla laitteilla, joilta oli jo ennestään loppunut valmistajan tuki niitä valmistavan yrityksen poistuttua markkinoilta. Keväällä 2016 ostoprosessi uudelle, modernimmalle tarkastuslaitteelle oli jo loppuvaiheessa. Uuden laitteen hyväksyntä yhtiötasolla tuotantokäyttöön vaatii muun muassa mittalaitteen mittauskävykkyyden analysoinnin sekä mittauksen stabiilisuuden saattamisen hyväksyttävälle tasolle.

Tämän työn tavoitteena oli selvittää edellä mainitut laitteen ominaisuudet sekä vertailla kävykkyyttä vanhoihin AVI-mittalaitteisiin. Mittalaitteanalyysin kahden viikon tarkasteluajan jälkeen laite vaikutti erittäin stabiililta ja tarkalta, mutta pidemmän aikavälin stabiilisuutta tarkasteltaessa havaittiin enenevässä määrin huolestuttavia piirteitä. Itse diplomityötä ajatellen tämä oli sinänsä positiivista, sillä se ohjasi työn fokusta selkeämpään suuntaan. Työn tavoitteeksi tarkentui siis myös havaittujen epätoivottujen ilmiöiden juurisyiden selvittäminen sekä niiden ratkaisumahdollisuuksien selvittäminen. Itse ratkaisujen implementointia työhön ei sisällytetä, sillä tämä venyttäisi työtä kohtuuttomasti.

Opinnäytteessä kartoitetaan lisäksi taustaa optiikasta ja valaistuksesta, tutkittavista elementeistä sekä niihin syntyvistä defekteistä ja valmistusprosessien kontrolloimisesta autoalan standardien mukaisesti. Nämä kaikki tekijät vaikuttavat osaltaan konenäköön ja MFI:n käyttämiin sovelluksiin, joko luoden niille rajoitteita taikka kasvattaen motivaatiota sovelluksien kehittämiseen.

## 2 Automatisoitu visuaalinen tarkistus

Käytännössä kaikkia teollisuudessa valmistettavia tuotteita tarkastetaan jollain mittalaitteella. Tarkastuksessa on tarkoitus määrittää, vastaako tuote sille asetetuja *spesifikaatioita*. Tarkastus on syytä erottaa *testaamisesta*, jossa tuotteen aktiivisia ominaisuuksia mitataan, jolloin ollaan vuorovaikutuksessa tuotteen kanssa. Automatisoitu visuaalinen tarkastus on siis puhtaasti laadunvalvontaan keskittyvä toimenpide. Tarkastuksen tuottamaa dataa käytetään viallisten tuotteiden havaitsemiseen ja hylkäämiseen sekä aikaisempien prosessivaiheiden kontrolloimiseen ja vertailuun [1]. Tarkastusprosessi voi tuottaa kvalitatiivisia tai kvantitatiivisia mittaustuloksia. [2]

Automatisoitu visuaalinen tarkastus on välttämätön osa korkean luotettavuuden ja massatuotettavan elektroniikan valmistusprosessia [3]. Yleensä teollisuuden valmistusprosesseissa tyydytään näytepohjaiseen tarkastamiseen, joka toteutetaan lähinnä edellisen prosessivaiheen kontrolloimisen vuoksi. Tämä on riittävää, mikäli tuotteen eliniälle tai luotettavuudelle ei ole asetettu tiukkoja kriteerejä. Tämänkaltaisen lähestymistapa on yleistä kulutuselektroniikassa, jossa tuotteelle voidaan hyväksyä korkeitakin PPM-tasoja (Parts Per Million). PPM:llä tarkoitetaan luotettavuustasojen yhteydessä viallisten osien osuutta miljoonasta valmistetusta osasta. Tyypilliset PPM-tasot elektroniikkakomponenteilla ovat sadoissa osissa. Muratan antureita käytetään erittäin korkean luotettavuuden sovelluksissa, kuten ajoneuvoelektroniikassa sekä lääketieteellisissä sovelluksissa, jolloin PPM-taso on saatava laskemaan yksikkötasolle. Tätä vaativat sekä lainsäädäntö että lukuisat standardit turvallisuuskriittisissä sovelluksissa [4] [5]. Hyvä PPM on myös merkittävä kilpailuetu. Mikään tarkastus ei kuitenkaan voi olla täysin ideaalinen spesifikaatioon nähden, vaan on aina olemassa riski tuotteen väärään luokitteluun. Tällöin esimerkiksi hyvän tuotteen luokittelua huonoksi kutsutaan tyyppin 1 riskiksi. Toisinpäin tapahtuvaa virhettä merkitään taasen tyyppin 2 riskiksi. Näiden riskien minimoiminen on tärkeää, sillä toteutuessaan ne kasvattavat joko valmistuskustannuksia saannon laskemisen seurauksena tai pahimmassa tapauksessa realisoituvat loppuasiakkaalla. [2] [6]

Optiset tarkastukset ovat myös avainasemassa FMEA-menetelmissä (Failure Mode and Effects Analysis). FMEA määrää, että tuotteessa mahdollisesti ilmeneviä vikoja tai riskejä kontrolloidaan siihen tarkoitetulla mittalaitteella. Vian tai riskin vakavuus ja esiintymisfrekvenssi sekä kyky havaita vika muodostavat yhdessä riskiluvun. Kyvykyys yksittäisten vikamoodien tai riskien havaitsemiseen määritellään mittalaitteanalyysissä tai asiantuntevan insinöörin toimesta. Näin tuotetaan yksi laaduton lukuarvo riskiä kohden laadunvalvontajärjestelmään, joka kuvaa kykyä havaita kyseinen riski tai vika sitä monitoroivalla mittalaitteella. Tämä havainnoinnista kertova luku linkitetään riskin esiintymistiheyteen ja vakavuusluokkaan. Näin voidaan yksinkertaisella mallilla kohdentaa resurssit joko vian tai riskin esiintymistiheyden pienentämiseen tai sen havaitsemisen parantamiseen. Vian vakavuus on ainoa tekijä, johon valmistajalla ei ole juurikaan mahdollisuuksia vaikuttaa. [4]

Visuaalinen tarkastus voidaan toteuttaa myös tuotantotyöntekijöillä eli operaat-

toreilla. Näin tehdäänkin yhä useissa prosessivaiheissa, joissa halutaan nopeasti varmistaa että prosessi tuottaa toivottua ulostuloa. Silmä on optisena sensorina erittäin tehokas, ja esimerkiksi tarkentaminen mielivaltaisille etäisyyksille on hyvin nopeaa. Silmän dynaaminen alue on myös laaja, ja se alkaa peräti yhdestä fotonista [7]. Lisäksi silmän ja aivojen välinen viestintä on nopeaa, jolloin aivot osaavat tunnistaa nopeasti oleelliset asiat sekä suodattaa prosessivaihtelusta oikeat viat. Vaikka ihmisen ominaisuudet optisia tarkastuksia ajatellen ovat tehokkaita ja sopeutuvaisia, käytännössä toistettavien ja luotettavien tarkastustulosten saaminen on liian epävarmaa. Operaattorien tehokkuus *defektien*, eli laatuun tai tuotteen prosessoitavuuteen vaikuttavien poikkeamien, löytämisessä on parhaimmillaankin yksinkertaisessa tarkastustehtävässä vain 80 % [2]. Lisäksi kyvykkyys tarkastuksiin on yksiselitteisistä työohjeista huolimatta operaattoreiden välillä hyvin vaihtelevaa. Automatisoidun mittalaitteen käyttö mahdollistaa paremman tarkastuskyvykkyuden lisäksi mahdollisuuden kyvykkyuden tarkempaan analyysiin, jolloin voidaan raportoida eri sidosryhmille tarkastuksen luotettavuutta analyttisesti. Tulokset tulee myös tallentaa tietokantaan, jolloin tuhansia viallisia elementtejä sisältävän piikiekon tulosten käsittelyyn menisi ihmiseltä useita tunteja, kun taas automatisoitu laite pystyy tähän muutamassa minuutissa. Operaattoreiden tekemä tarkastus lisäksi luovuttaa riskejä, sillä tuotteiden käsittely tarkastusta varten sekä sen aikana voi vahingoittaa tai kontaminoida ne. [1] [2] [3]

Tarkastuksen automatisointiin on oltava hyvin perustellut syyt, sillä luotettavan ja tehokkaan tarkastussysteemin kehittämiseen kuluu merkittäviä summia rahaa. Syitä automatisointiin ovat muun muassa suuret tuotantovolyymit, vaatimus erittäin tarkkoille mittauksille tai hyvälle mittausten toistettavuudelle. Lisäksi kustannussäästöt korkeiden työvoimakustannuksien maassa voivat olla hyvinkin merkittäviä [2]. Kaikki edellä luetellut syyt täyttyvät MFI:n tuotteiden osalta. Tämän lisäksi tarkastettavat tuotteet ovat luotettavan sijainnin, orientaation ja geometrian osalta konenäölle verrattain helppoja tarkastuskohteita. Puolijohdeteollisuuden optisiin tarkastuksiin erikoistuneita laitevalmistajia on nykyään useita, joten eri laitteiden vertailu ja kilpailutus keskenään on mahdollista. Laitteet ovat myös pääsääntöisesti modulaarisia, joten haastavampia tarkastuksia varten valmistajilta voi saada ongelman ratkaisemiseen vaadittavia lisäominaisuuksia. Kaikesta tästä huolimatta tarkastuksen kyvykkyyttä ei välttämättä saada aivan halutulle tasolle, jonka vuoksi tarkastusten optimointi vaatii usein paljon prosessikehitystä useita vuosia laitehankinnan päättymisen jälkeen.

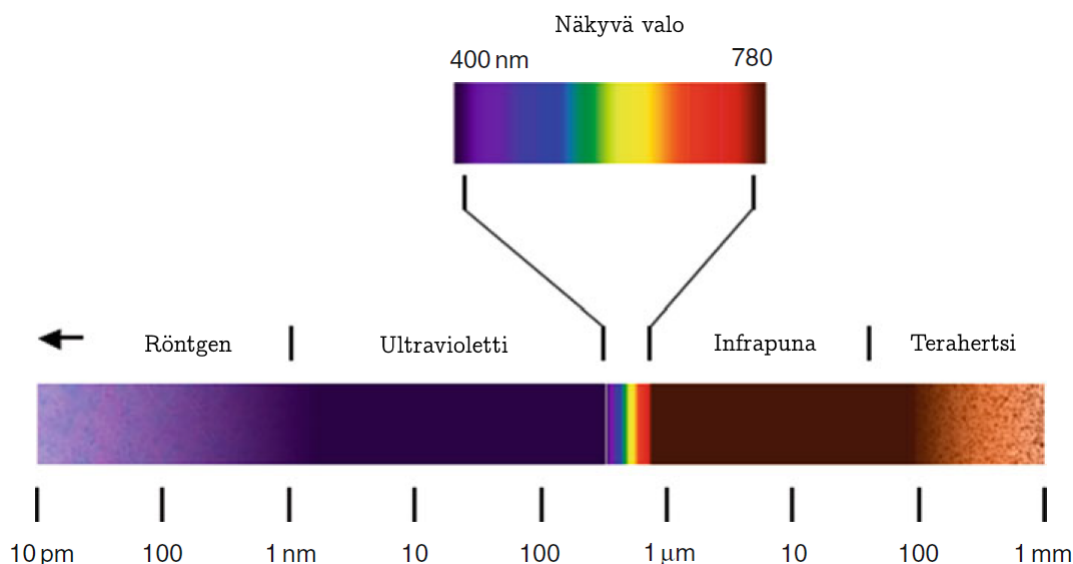
Tässä kappaleessa syvennytään teoreettiseen perustaan visuaalisen tarkastuksen taustalla. Ensiksi käsitellään optiikkaa, koska sillä on perustavanlaatuinen vaikutus prosessoitavan kuvan häiriöttömään muodostamiseen sekä se luo rajoituksia sille, miten joustavasti laitetta voidaan käyttää. Tämän jälkeen perehdytään valonlähteisiin ja valaistusmenetelmiin. Erilaisilla valaistusmenetelmillä pystytään korostamaan kiinnostavia tekijöitä kohteesta kasvattamalla kontrastia. Valonlähteen ominaisuudet taas vaikuttavat systeemin stabiilisuuteen sekä siihen, millaisella spektrillä kohdetta valaistaan. Materiaalien taite- ja heijastuskerroin riippuu aallonpituudesta, jolloin oi-

kean sävyisellä valolla saadaan myös kontrastia paremmaksi. Tästä jatketaan optisiin suodattimiin, joilla voidaan suoraan manipuloida lampun sekä kohteesta heijastuvan valon spektriä. Kun valo sekä optiikka ovat luoneet kohteesta kuvan, se siirtyy kameran kennolle käsiteltäväksi. Kuvantamistekniikoita käsitellään myös yhdessä kappaleessa. Tästä siirrytään kuvankäsittelymetodeihin, sillä niillä on tärkeä rooli kuvan pilkkomisessa kiinnostaviin osiin ja häiriöiden poistossa.

## 2.1 Optiikka

Optiikalla on valaistuksen ohella merkittävin rooli optisissa systeemeissä. Sillä tuotetaan mahdollisimman hyvälaatuinen ja halutulla suurennoksella tuotettu kuva kameran kennolle. Laadukas optiikka vähentää tarvetta kuvan ohjelmalliselle korjaukselle, täten parantaen signaali-kohina suhdetta. Huonosti suunniteltu optiikka ei tuota luotettavia dimensiomittauksia, ei tarjoa riittävästi syvyystarkkuutta sekä vääristää kuvaa. [8]

Valon ominaisuuksia voidaan tarkastella kolmesta eri näkökulmasta: aalto-, hiukkas- tai sädemallin kautta. Sädemalli on yleensä täysin riittävä suurimpaan osaan käytännön tilanteista konenäköä ajatellen. Aaltomalli tulee huomioida vasta erittäin pieniä objekteja tutkiessa sekä tutkittavan materiaalin sähkömagneettisten ominaisuuksien tullessa esille. Hiukkastasolla ei ole käytännöllistä merkitystä, sillä ihmissilmä sekä sensorit tarvitsevat suuria hiukkasmääriä tuottaakseen merkittävän vasteen. [8]



Kuva 1: Näkyvän valon sijoittuminen sähkömagneettisen säteilyn spektrissä. [8]

Seuraavissa alakappaleissa käsitellään optiikan peruskäsitteitä. Siitä syvennyttään

tarkemmin linssien toimintaperiaatteeseen sekä tyypillisimpien linssien epäideaalisuuksien tuottamiin häiriöihin ja niiden merkitykseen konenäön kannalta.

### 2.1.1 Sähkömagneettinen säteily kahden aineen rajapinnassa

Valon käyttäytyminen kahden eri materiaalin rajapinnassa määräytyy Maxwellin yhtälöiden perusteella. Maxwellin yhtälöt kuvaavat valon aaltoluonnetta, minkä perusteella saadaan sähkömagneettisen aallon nopeudeksi tunnetussa materiaalissa

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0}}, \quad (1)$$

jossa  $\epsilon_0$  on tyhjiön permittiivisyys ja  $\mu_0$  tyhjiön permeabiliteetti. Suureet  $\mu_r$  ja  $\epsilon_r$  kuvaavat suhteellista permittiivisyyttä sekä suhteellista permeabiliteettiä, jotka ovat usein kompleksisia ja aallonpituudesta riippuvia. Samasta yhtälöstä saadaan valonnopeus tyhjiössä, kun suhteellinen permeabiliteetti ja permittiivisyys saavat arvon yksi. [9] [10]

Yhtälöstä 2 saadaan taitekerroin  $n$ , kun verrataan ryhmänopeutta valonnopeuteen sekä oletetaan suhteellinen permeabiliteetti ykköseksi:

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r} \quad (2)$$

Rajapinnan sähkömagneettisen kentän jatkuvuuden perusteella voidaan johtaa myös *Snellin laki*, joka kertoo taittumiskulman kahden eri taitekertoimen omaavan materiaalin välillä [9]:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_\beta}{n_\alpha}, \quad (3)$$

jossa  $\alpha$  on rajapintaan saapuvan aaltovektorin kulma suhteessa pinnan normaaliin ja  $\beta$  on taittunut kulma toisessa materiaalissa. Aallon tulosuunnassa olevan aineen taitekerroin on  $n_\alpha$  sekä vastaavasti  $n_\beta$  on rajapinnan jälkeisen aineen taitekerroin. Koska taitekerroin vaikuttaa valon taittumisen kulmaan, sillä on perustavanlaatuinen vaikutus linssin optisten ominaisuuksien kannalta. Lisäksi materiaalin permittiivisyys  $\epsilon_r$  on kompleksista sekä kaikilla materiaaleilla enemmän tai vähemmän sähkömagneettisen aallon taajuudesta riippuvaa, jolloin valon taittumiskulma eri värisävyille vaihtelee.

*Absorptio* kuvaa materiaalin kykyä absorboida tehoa jollain tietyllä sähkömagneettisen spektrin alueella. Absorptiossa atomin kanssa vuorovaikuttuva fotoni siirtää osan energiastaan valenssielektronille siirtäen sen korkeampaan energiatilaan [10]. Esimerkiksi puolijohteisiin perustuvilla CCD- ja CMOS-kennoilla tämä prosessi muodostaa varauksen, joka luetaan ulos pikselinä [11]. Absorboitunut energia voi myös muuttua lämmöksi. Absorptio on eri materiaaleilla ja pinnan tekstuurista riippuen vahvasti taajuusriippuvaista, jonka ansiosta näemme eri värisiä asioita ympärillämme. Kuvassa 1 nähdään aallonpituuden funktiona näkyvät värit sekä niiden sijoittuminen



isommassa mittakaavassa. [8]

*Sironta* on ilmiö, jossa sähkömagneettinen aalto muuttaa suuntaansa vuorovaikuttaessaan esteen kanssa tai väliaineen tiheyden vaihtumisen johdosta. Sirontaa tapahtuu esimerkiksi hiotulla lasipinnalla, jossa on pieniä hiontauria tai naarmuja. Tätä ominaisuutta voidaan käyttää lasin pinnanlaadun selvittämiseksi optisin menetelmin. Tämänkaltaisia epätasaisia pintoja kutsutaan *sirottaviksi* tai *diffusioiviksi* [12]. Sironnan ääriesimerkkinä ovat niin kutsutut Lambertian-sirottavat pinnat, jotka heijastavat valoa isotrooppisesti kaikkiin suuntiin. Sirontaa käytetään myös hyväksi valoa hajottavissa diffuuserissa, joiden sisällä on fotonien liikesuuntaan vaikuttavia partikkeleita. Näin saadaan aikaan mahdollisimman homogeeninen valaistus diffuuserin ulostuloon. Heijastavat pinnat ovat erityistapaus sironnasta, sillä niissä pinnanlaatu on hyvin tasainen. Tasainen pinta heijastaa aaltovektorin tulokulmaan nähden identtisessä kulmassa pinnan normaaliin nähden, mihin perustuu esimerkiksi peilien toiminta. Tutkittavan pinnanlaadun tunteminen edesauttaa esimerkiksi valaistustasojen sekä valaistusmenetelmien valinnassa [8].

### 2.1.2 Linssit

Linssit jaetaan karkeasti kahteen pääryhmään: valoa kokoaviin sekä hajottaviin linssihin. Linssin polttoväliä kuvataan etäisyydellä  $f$ , jolla sijaitsee polttopiste. Polttoväli määräytyy linssin kaarevuuden perusteella yhtälön 4 mukaan. Polttopiste on alue, jossa linssin pääakselin suunnassa yhdensuuntaisesti kulkevat valonsäteet leikkaavat toisensa. Esineen sijainti polttopisteeseen nähden vaikuttaa siihen, muodostuuko kohteesta *todellinen kuva* vai *valekuva* sekä miten kauas kuva muodostuu. [9]

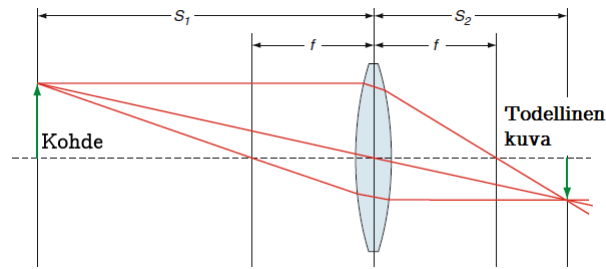
Linssejä käytetään optisissa systeemeissä kuvan siirtämisessä ja suurentamisessa kuvantamiskennolle. Lisäksi mikrolinssejä voidaan käyttää esimerkiksi CCD-kennoissa, jotta saapuvat valonsäteet voidaan keskittää fotosensitiivisille alueille, jolla saadaan merkittävästi parannettua herkkyyttä. [8]

Polttoväli määräytyy *linssintekijän yhtälön* perusteella seuraavasti:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left[ \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n - 1)d}{nR_1R_2} \right], \quad (4)$$

jossa  $R_1$  on valonlähteen puolella olevan lasipinnan kaarevuussäde ja  $R_2$  valonlähdetä päinvastaisella puolella oleva lasipinnan kaarevuussäde. Ilman taitekerroin  $n_{ilma}$  on hyvin lähellä yhtä, joten se on yleensä jätetty yhtälöstä pois, kun taas linssin materiaalin taitekerroin on  $n$ . Termi  $d$  kuvaa lasipintojen välistä etäisyyttä, toisin sanoen linssin paksuutta. Kaarevuussäteiden etumerkki määräytyy seuraavasti: kupera linssi valonlähteen puolella saa negatiivisen etumerkin, kovera positiivisen. Toisella puolella tilanne on päinvastainen. Linssit ovat yleensä niin ohuita, että viimeinen

linssin paksuuden sisältämä termi jätetään laskusta pois merkityksettömänä. [9]

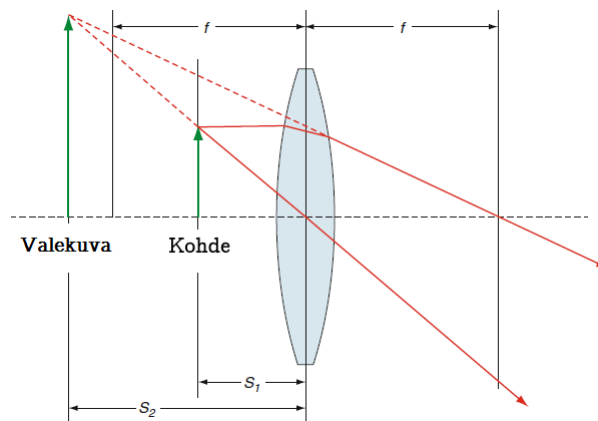


Kuva 2: Kupera linssi, kohde kauempana kuin linssin polttoväli. Katkoviiva on linssin pääakseli. [8]

Linssin pääakselilla oleva kuva muodostuu yhtälön 5 mukaan:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2}, \quad (5)$$

jossa  $S_1$  ja  $S_2$  ovat valonlähteen etäisyys ja muodostuvan kuvan etäisyys linssin keskipisteestä, kuten kuvassa 2 on esitetty. Tällöin tutkittavan esineen ollessa etäisyydellä  $S_1$  saavutetaan matemaattinen fokus kennolle, joka on pisteessä  $S_2$ , johon todellinen kuva piirtyy. Tämä fokusalue on kuitenkin todellisuudessa laajempi, sillä kvantisoitavaan kuvaan voidaan tarkentaa vain pikselin määrittelemään tarkkuuteen, resoluutioon saakka. [3] [8]



Kuva 3: Kupera linssi, kohde lähempänä kuin linssin polttoväli. [8]

Kun tutkittava kohde on polttovälin ja linssin sisäpuolella, kohde suurentuu ja muodostaa *valekuvan* kuvan 3 mukaisesti. Valekuva tarkoittaa sitä, että sitä ei voida suoraan projisoida mihinkään pinnalle. Tämän vuoksi tarvitaan muita linssejä kuvan

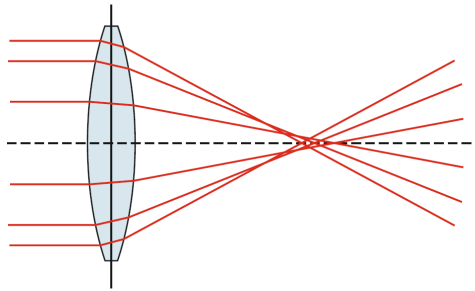
siirrossa tavoitetulle pinnalle. Polttovälistä sekä tutkittavan esineen etäisyydestä voidaan johtaa suurennussuhde  $M$  seuraavasti:

$$M = -\frac{S_1}{S_2} = \frac{f}{f - S_1} \quad (6)$$

### 2.1.3 Kuvan terävyys ja aberratiot

Mikroskopiaa ajatellen yksi tärkeä tekijä on *aukkosuhde*, eli f-luku. Aukkosuhde on dimensioton suure ja se määritellään polttovälin ja valon sisääntuloaukon eli *apertuurin* välisenä suhteena. Suurempi aukko tuottaa enemmän valoa sensorille, mutta kaventaa syväterävyysaluetta. Syväterävyysalueella tarkoitetaan matkaa, jonka kuvattava *kohde* voi liikkua linssin pääakselia pitkin ennen kuin fokus menetetään. Toinen terävyyttä määrittelevä tekijä on taas tarkennusvara, jolla tarkoitetaan kuvaa käsittelevän *sensorin* mahdollista liikevaraa pääakselin suhteen. [8]

Terävyyteen vaikuttavat poikkeamat ja vääristymät linseissä. Halvemman hintaluokan linseissä vääristymiä on enemmän, mutta laadukkaissakin linseissä on aina joitain epäideaalisuuksia. Vääristymien juurisyy on hyvä tietää, sillä niiden vaikutuksia voidaan suodattaa ohjelmallisesti tai mekaanisilla ratkaisuilla. Seuraavaksi luetellaan merkittävimpiä vääristymiä. [8]

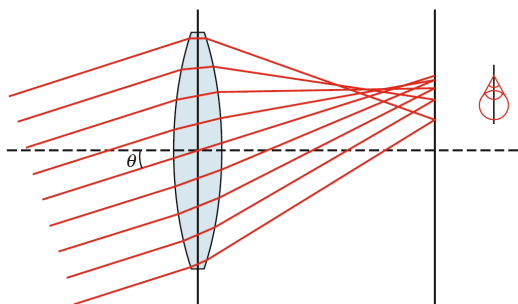


Kuva 4: Palloaberraatio. Vääristymä kasvaa linssin reunoja kohti. [8]

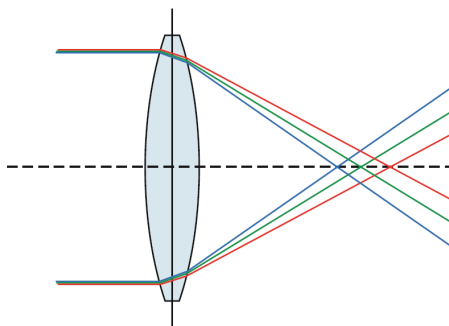
*Palloaberraatio*, joka on esitetty kuvassa 4, tarkoittaa häiriötä, jossa linssin pääakselin suunnassa saapuvat säteet taittuvat eri polttopisteisiin. Tämä sumentaa kuvaa, mikä vaikeuttaa esimerkiksi ohuiden piirteiden havaitsemista. Ongelmaa voidaan välttää esimerkiksi apertuuria pienentämällä, sillä aberratio kasvaa linssin pääakselista etäännyttäessä. [8] [9]

*Kooma* on poikkeama, jonka vuoksi kuvannettavalle kohteelle muodostuu häntä. Kooma muodostuu kohteelle, jonka sijainti on optiseen akseliin nähden kulmassa  $\theta$  ja jonka säteet tulevat toisiinsa nähden yhdensuuntaisesti. Linssin keskeltä kulkevat säteet fokusoituvat etäisyydelle  $f \tan \theta$ . Kauempaa linssin keskipisteestä tulevat säteet fokusoituvat eri kohtaan, jolloin muodostuu joko negatiivista tai positiivista koomaa. Negatiivisessa koomassa poikkeama syntyy linssin pääakselin suuntaan ja

positiivisessa päinvastoin. Jos säteet tulevat ympyräsymmetrisesti, syntyy komeettaa muistuttava halo, sillä poikkeama siirtyy pääakselia vasten kohtisuorasti sekä kasvaa linssin reunoja lähestyttäessä. Kuvassa 5 on havainnollistettu, miten komeettamainen kuvio syntyy kaksiulotteiseen tasoon. Ongelma saadaan yleensä poistettua linssien huolellisella valinnalla sovellusta ajatellen sekä kuvantamalla kohteita pääakselin suuntaisesti, eli riittävän kaukana optiikasta. [8] [9]



Kuva 5: Kooma. Kuvan oikeassa reunassa kuvattuna komeettamainen kuvio vääristymän johdosta kaksiulotteisessa tasossa. [8]



Kuva 6: Kromaattinen aberraatio eli väripoikkeama. [8]

*Kromaattinen aberraatio* johtuu valkoisen valon sisältämästä spektristä sekä linssimateriaalin spektraalivasteesta. Linssin materiaalin taitekerroin vaihtelee aallonpituuden mukaan. Tämä vaikuttaa taas  $f$ -lukuun, jolloin eri aallonpituudet fokusoituvat eri pisteisiin, kuten esitetty kuvassa 6. Linssit toimivat siis käytännössä aina valoa hajottavana prismana. Ongelmaa voidaan korjata linssisysteemillä, jossa eri linssipuoliskot on valmistettu eri materiaaleista. Tällä tavalla saadaan poistettua rajalliselta spektriltä väriaberraatio käytännössä olemattomaksi. Konenäkösovelluksissa, joissa käytetään mustavalkoisia kuvia, poikkeama on lähes merkityksetön. [8] [9]

*Astigmaattisuus*ulla tarkoitetaan ilmiötä, jossa horisontaaliset ja vertikaaliset piirteet kohteesta fokusoituvat eri etäisyyksille. Tällöin resoluutio ei ole homogeeninen

vaan suunnasta riippuva. [8]

*Näkökentän kaarevuus* on ilmiö, jossa optista akselia nähden kohtisuorassa olevat pisteet fokusoituvat eri etäisyyksille linssistä. Tällöin kuvan keskipiste on fokuksessa mutta reunat eivät ole. Ongelma voidaan ratkaista joko monimutkaisella kennorakenteella, mutta tavanomaisesti on riittävää pienentää apertuuria, eli käyttää pienempää osaa linssistä. [8] [9]

*Vääntymä* tarkoittaa kuvattavan kohteen muodon vääntymistä, esimerkiksi neliön reunat vääntyvät sisään- tai ulospäin. Usein vääntymä vahvistuu linssin reunoja kohti. Vääntymä on yleinen ja haitallinen häiriö, jota on syytä korjata ohjelmallisesti. Häiriö on lisäksi sellainen, että sitä esiintyy jossain määrin kaikilla linseillä. Ilmiö johtuu siitä, että optista akselia vastaan kohtisuora, mutta akselistä sivussa oleva suora viiva ei ole kauttaaltaan samalla etäisyydellä optisesta keskipisteestä. [8]

## 2.2 Valaistus ja valonlähteet

Huolellisesti suunniteltu valaistus on perusoletuksena hyvin toteutetuissa automatisoiduissa optisissa tarkastuksissa. Ihmissilmä ei huomaa pieniä muutoksia ympäristönsä valaistuksessa, sillä aivot aktiivisesti kompensoivat ne huomaamattomiin. Konenäön kanssa tilanne on tyystin toinen. Esimerkiksi muutaman prosentin muutos valaistuksen intensiteetissä vaikuttaa merkittävästi mittalaitteen stabiilisuuteen ja mittauksien toistettavuuteen ja sitä kautta luotettavuuteen. Muita tärkeitä tekijöitä valonlähdeä valittaessa on esitetty taulukossa 1. Valonlähteen tuottamaa intensiteettiä olisi myös syytä mitata sekä säätää takaisinkytkennällä mahdollisimman stabiiliin ulostulon takaamiseksi. [8]

Seuraavaksi perehdytään eri tekniikoihin, joilla valoa voidaan tuottaa. Tästä edetään erilaisiin valaistustapoihin, sillä valonlähteiden sijoittamisella on suuri vaikutus erilaisiin pinnan profileja korostettaessa.

### 2.2.1 LED-valonlähteet

LED-valonlähteet täyttävät suurimman osan taulukossa 1 määritellyistä ominaisuuksista. LED-valonlähteet voidaan rakentaa siten, että eri aallonpituuksia emittoivilla ja mallisilla ledeillä voidaan tuottaa haluttu spektri. Ne ovat turvallisia eivätkä tuota suurta määrää lämpöä, joka helpottaa valonlähteen implementoimista systeemiin. LED-valaisinten käyttöikä voi olla jopa satojatuhansia tunteja, jolloin lampunvaihtoista syntyvät kulut ovat mitättömiä. Tietyt ledit emittoivat infrapunasäteilyä, jolloin niillä voidaan nähdä jopa piin sisäisiä rakenteita [13].

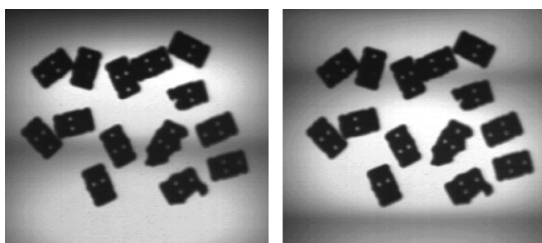
Tietyn ledimallin spektri on yksittäisten lediosien välillä hyvin tasainen sekä pysyy pitkän käyttöajan yli stabiilina. Tämän vuoksi ledit ovat erittäin pitkäikäisiä sekä huoltovapaita, ja erivärisiä ledejä sekoittamalla saadaan kontrolloitu spektri.

Taulukko 1: Valaistuslähteen ominaisuudet MEMS-tarkastuksien vaatimukset huomioiden. Taulukkoa on muokattu lähteestä [8].

<b>Valaistuslähteen ominaisuus</b>	<b>Merkitys systeemille</b>	<b>Tärkeys</b>
Intensiteetin pitkän ajan stabiilisuus	Vaihtuva intensiteetti vaikuttaa tarkastusalgoritmien kritisointeihin	Erittäin suuri
Intensiteetin kontrollointi	Saadaan säädettyä taustataso eri tuotteille. Lisäksi takaisinkytkennän säätö	Erittäin suuri
Valaistuksen ohjaus	Tehonsyöttö (tasa- tai vaihtovirta). Modulointitekniikka sovitettava sensorille	Suuri
Valonlähteen spektri	Vaihteleva spektri lamppujen välillä tuottaa ongelmia, mikäli käytetään värifiltteriä taikka kohteen väri-informaatio on tärkeää	Erittäin suuri
Valon tulokulma	Kulma tutkittavaan pintaan vaikuttaa suoraan siihen, mitkä kohteen osat korostuvat kuvassa	Suuri
Infrapunasäteily	Voi vahingoittaa tutkittavaa tuotetta taikka optiikkaa	Pieni
Tehokkuus	Sähkötehon muuntosuhde valaistuksen intensiteetiksi	Erittäin pieni
Sähköinen häiriö	Valaistus, ja sen tuottamisen aiheuttama häiriö systeemille	Erittäin pieni
Lämmön tuotto	Osa tehosta muuttuu väistämättä lämmöksi	Erittäin pieni
Turvallisuus	Hajotessaan voi vapauttaa myrkyllisiä aineita. Lisäksi valonlähde voi häiritä operaattoreita	Erittäin suuri
Elinikä	Valojen vaihtaminen tuottaa kustannuksia ja on pois laitteen tuotantoajasta	Suuri

Usein halutaankin niin sanottua valkoista valoa, jolla on suhteellisen tasaisen spektri näkyvän valon alueella. Lisäksi eri määriä ledejä voidaan mitoittaa siten, että kameran kennon taajuusvaste tuottaa lopulta täysin tasaisen signaalivasteen eri aallonpituuksille. Tämä on tärkeää sovelluksissa, joissa on tarve tulkita värillistä kuvaa, kuten esimerkiksi läpiladottavia vastuksia joissa väriraidat kertovat niiden vastusarvon. Ledit ovat lisäksi hyvin suuntaavia valonlähteitä, jolloin niiden teho voidaan suunnata tarkasti kohteeseen, jolloin saavutetaan hyvä hyötysuhde valaistustehon ja sähkötehon välille. Lisäksi näytteitä ja optiikkaa lämmittävän infrapunasäteilyn määrä on usein ledeillä vähäistä. [8]

Valotehon säätö on helppoa, sillä ledit ovat komponentteina yksinkertaisia käyttää. Valaistusintensiteetti on verrannollinen syötettävään virtaan, jolloin pelkällä tasajännitelähteellä sekä potentiometrillä kytkettynä sarjaan ledien kanssa voidaan toteuttaa yksinkertainen ohjaus valaistukselle. Lisäksi ledien emittoima spektri pysyy kohtalaisen stabiilina syötetyn tehon suhteen. Toinen tapa hallita intensiteettiä on pulssinleveysmodulaatio. Pulssinleveysmodulaatiossa kuorman jännitettä katkotaan pulssisuhteen määräämällä taajuudella, jolloin pulssisuhde määrää suoraan suhteellisen, kuormalle syötetyn tehon. Toisin sanoen, ledille syötettävää virtaa katkotaan sopivalla taajuudella, jolloin ledi vilkkuu. Vilkuttaminen ei kuitenkaan haittaa, sillä kamera-sensorit toimivat integraattoreina, summaten kaikki valotusaikana saapuneet fotonit. Jos modulaatiota toteutetaan liian matalalla taajuudella, tapahtuu kuvassa 7 havainnollistettua laskostumista. Tämä vilkuttamismenetelmä voi tosin olla ihmisaivoille haitallista ja väärin toteutettuna saattaa laukaista käyttäjissä epileptisen kohtauksen [8] [12].



Kuva 7: Laskostuminen. Kuvaan muodostuu raitoja johtuen liian hitaasta kennon valotusajasta verrattuna pulssimodulaation taajuuteen. [8]

### 2.2.2 Purkauslamput

Purkauslamput ovat edullisia sekä korkean valaistustehon tuottavia valonlähteitä, joita käytetään erityistä tarkkuutta vaativissa tehtävissä sekä suuria pinta-aloja valaistessa [14]. Lamppujen purkauskuvun sisällä on erittäin matala paine sekä jalokaasua, kuten esimerkiksi heliumia, argonia tai kryptonaa. Lisäksi osissa purkauslampuista on myös lisätty elohopeaa, natriumia taikka metallihalideja. Kun

purkauskuvun anodin ja katodin välille kytketään tarpeeksi suuri jännite, osa kaasuatomeista ionisoituu positiivisesti. Sähkökentän vuoksi ionisoitunut atomi kiihtyy kohti negatiivista anodia. Kiihtynyt ioni ei kuitenkaan käytännössä koskaan saavuta anodia, vaan osuu matkalla neutraaliin atomiin, joka luovuttaa elektroninsa positiivisesti varautuneelle ionille. Tällöin syntyy ketjureaktio, joka synnyttää erittäin ionirikkaan, sähköä johtavan *plasman* [12]. Kun plasmaa on kertynyt tarpeeksi, kaasuiotit osuvat katodiin jolloin siitäkin irtoaa atomeja plasmaan. Kaasupurkauslampun kulumisen huomaa juurikin kutistuvasta katodista. Osa atomien ja ionien välisistä törmäyksistä saa aikaan sen, että elektronin vastaanottavat ionit vapauttavat saamansa energian emittoimalla fotonin. Lampun tuottamaan spektriin vaikuttavat siten käytetyt kaasut, katodin metalli, kaasun ja lisäaineen suhde, lampun paine sekä lampun napojen jännite. Ketjureaktion vuoksi tarvitaan yleensä hetki aikaa sille, että lamppu lämpiää ja lampun tuottama spektri ja intensiteetti ovat stabiileja. [8]

Purkauslamppuissa tulee myös huomioida plasman vaikutus sähköiseen käyttäytymiseen. Lamppu ei noudata Ohmin lakia, sillä plasman johtavuus kasvaa virran kasvaessa [12]. Tämän vuoksi lampun käyttäminen vaatii kuristinta, jotta virta ei pääse kasvamaan hallitsemattomasti ja rikkomaan lamppua. Kuristin on joko käämi tai elektroninen kytkin, joka rajoittaa virran kulkua. Jos kuristin ohjaa lamppua samalla taajuudella kuin kuvauskennoa luetaan, syntyy kuvaan tummia tai vaaleita raitoja. Tämän vuoksi on suositeltavaa ajaa lamppua elektronisella kytkimellä, joka lähettää halutulla taajuudella kanttiaaltoja [8]. Lisäksi kuristimen avulla tuotetaan alustava sähköpurkaus, joka sytyttää loisteputken [12].

Yksi tyypillisimmistä purkauslamppuista on loistelamppu. Siinä on jalokaasun lisäksi käytetty elohopeaa, joka emittoi UV-säteilyä. UV-säteily on valonlähteissä lähinnä haitallinen ilmiö, sillä kennojen vaste ei ole UV-säteilylle kovin suuri eikä stabiili aallonpituuden vaihteluun nähden. Tämän vuoksi lampun pinnalla on fluoresoivaa materiaalia, joka muuttaa UV-säteilyn näkyväksi valoksi. Fluoresoivassa materiaalissa atomin vastaanottama sähkömagneettinen säteily ei muutu lämmöksi, vaan muuttuva energiatila saa aikaan uuden fotonin emittoitumisen. Fotonin taajuus on näkyvän valon aallonpituudella, joten fluoresoiva materiaali toimii eräänlaisena taajuusmuuttajana. [12]

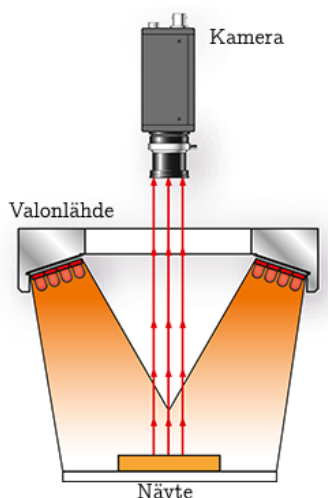
Kehittyneempiä purkauslamppuja edustavat niin sanotut *metallihalidilamput*. Niissä natriumista tai elohopeasta valmistettuun purkauslamppuun on lisätty halideja, kuten esimerkiksi natriumia, cesiumia, tuliumia tai litiumia. Täyteaineiden funktio on laajentaa emittoituvaa spektriä, ja luoda siten luonnollisempaa ja värisävyltään rikkaampaa valoa. Eri halidit omaavat erilaiset aktivaatioenergiat, joten tietyllä halidilla saadaan emittoitua halidille ominaista aallonpituutta. Halideja yhdistelemällä saadaan siis muodostettua käyttötarkoitukseen sopiva spektri [12].



### 2.2.3 Valaistusmenetelmät

Valaistusmenetelmällä tarkoitetaan yleisesti ottaen valonlähteiden sekä käytetyn optiikan yhteensovittamista. Sopiva valaistusmenetelmä riippuu täysin tutkittavan materiaalin taitekertoimesta ja heijastavuudesta eri aallonpituuksille, pinnan morfologiasta, etsittävistä defekteistä sekä tutkittavan alueen koosta. [15]

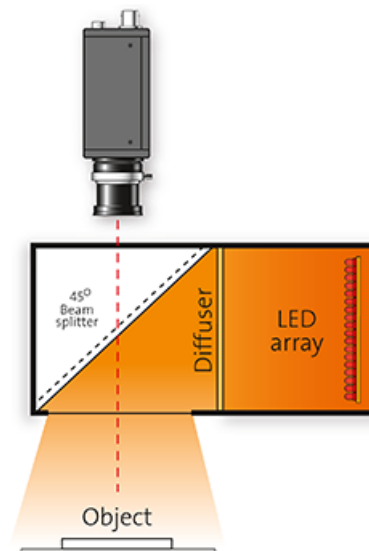
Yleisesti mikroskoopeissakin käytetty valaistustyyppi on *suora etuvalaistus*. Valaistuksen sijainti ja suunta on säädetty siten, että valonlähteen muodostamat säteet peilaavaa pintaa vasten täyttävät koko kameran kennon. Tällöin kirkasta taustaa vasten erottuvat selkeästi partikkelit sekä pinnan muut epätasaisuudet tummina alueina. Menetelmä on havainnollistettu kuvassa 8. [14]



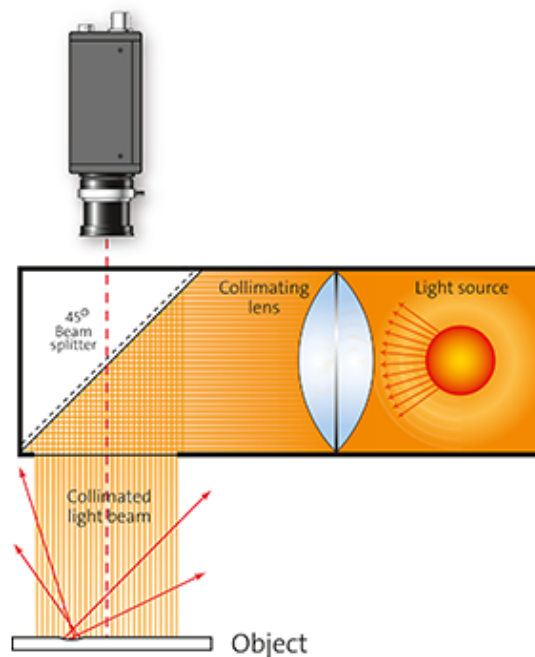
Kuva 8: Etuvalaistus. [14]

Etuvalaistuksen voi toteuttaa myös niin kutsutulla *koaksiaalivalaistuksella*, kuten kuvassa 9. Tällä menetelmällä valaistus tulee lähes yhdensuuntaisesti optiseen akseliin nähden. Valo ohjataan sivulta puoliläpäisevällä peilillä näytteeseen. Näytteestä palaavasta valosta pääsee sensorille myös puolet. Lisäksi peilin ja valonlähteen välillä on sirottava diffusointilevy, jolla on tarkoitus tehdä valaistuksesta homogeeninen. Tämä menetelmä sopii peilimäisen pinnan valaistukseen, sillä tällä tavalla saadaan tasainen intensiteetti kaikkialle näytteelle. Tätä valaistusmenetelmää käytetään sen vuoksi piikiekkujen kuvantamissovelluksissa [14]. Koaksiaalivalaistusta voidaan myös jatkokehittää valoa kollimoivalla linssillä, joka on havainnollistettu kuvassa 10. Kollimoitu valo koostuu yhdensuuntaisista säteistä, jolloin homogeenisessä näytteessä mahdollisesti olevat kuopat, urat ja halkeamat sirottavat valoa, jonka johdosta ne erottuvat erittäin selkeästi tummina alueina muodostuvasta kuvasta.

"Dark field", eli niin kutsuttu *pimeäkenttä* on valaistusmenetelmä, jossa valonlähde valaisee näytettä sivulta loivassa kulmassa, kuten kuvassa 11. Tällöin tasaiseen,



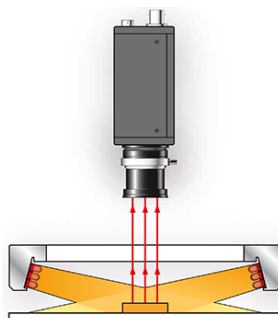
Kuva 9: Koaksiaalivalaistus [14]



Kuva 10: Kollimoitu koaksiaalivalaistus [14]

peilaavaan pintaan saapuva valonsäde heijastuu samassa kulmassa, jolloin kameralla nähdään tumma tausta. Taustasta erottuu hyvin kirkkaina kaikki sirottavat objektit [9]. Menetelmä voidaan myös toteuttaa koaksiaalivalaistuksella sekä mikroskoopin linssiin asennettavalla suodattimella, joka estää peilautuneiden säteiden palaamisen näytteestä. Menetelmällä saadaan siis esimerkiksi naarmut taikka tummaa taustaa vastaan olevat tummat partikkelit erittäin hyvin näkyviin. Etuvalaistusta käyttämäl-

lä ei nähdä kovin hyvin lasilla olevia defektejä, sillä lasi itsessään sirottaa ja siten kätkee mahdolliset defektit kuvaan piiloon. Voimakkaalla pimeäkentällä taas saadaan lasin aiheuttama sirottuminen häivytettyä ja defektit korostettua erittäin tehokkaasti [14]. Pimeäkentän ongelmana on taas mitata kuvasta dimensioita: sirottava valo muodostaa usein rinkelamaisen halon, jolloin defektit ja pinnan sirottavat tekstuurit näyttävät suuremmilta kuin todellisuudessa ovat. [9]



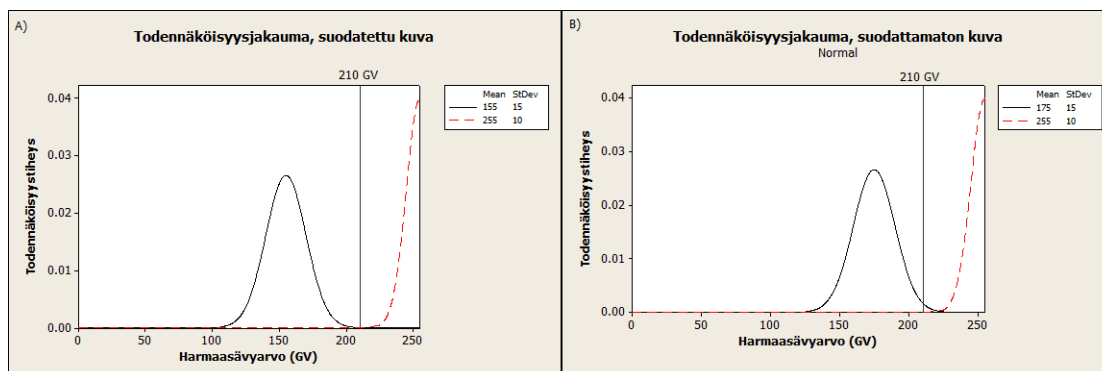
Kuva 11: Pimeäkenttä [14]

Lisäksi yksi MEMS-tuotteiden tarkastuksessa käyttökelpoinen valaistusmetodi on *takavalaistus*. Tässä menetelmässä tutkittava objekti asetetaan läpinäkyvälle alustalle, jonka alapuolelle valonlähde sijoitetaan. Tällä menetelmällä saadaan tarkasti rajattua tummien objektien reunat esimerkiksi koon mittaamista varten. Muuta informaatiota ei tällä menetelmällä oikeastaan saada, ellei tutkittavassa kohteessa ole läpinäkyviä, tarkastettavia alueita. [14]

### 2.3 Suodattimet

Kuvan suodatus fyysisillä suodattimilla on tärkeässä osassa defektien korostamisessa, piin ja metallialueiden kontrastin kasvattamisessa sekä häiriöiden poistamisessa. Mitä suuremmalla kontrastilla tutkittavat asiat kuvasta erottuvat toisistaan, sitä vähemmän tarvitaan kuvan ohjelmallista suodattamista. Tällöin säästyy kuvaa käsittelevän prosessorin laskentatehoa jolloin prosessi nopeutuu ja saadaan ylipäänsä luotettavampaa dataa mittauksista. Koneellisella suodatuksella määritetään ennalta määrätty harmaasävyarvo eli GV (Gray Value), jolla erotellaan esimerkiksi piialueet metallialueista. Jos kontrasti ei ole riittävä, osa pii- ja metallointialueista tulkitaan ristiin näytteiden harmaasävyarvon noudattaessa likimain normaalijakaumaa. Suodatuksen merkitystä havainnollistavassa kuvassa 12 nähdään simuloituna suodatuksen vaikutus eri alueiden kategorisointiin. [8]

Tyypillisimpiä suodattimia ovat *värisuodattimet*, jotka kaikessa yksinkertaisuudessaan ovat väriaineella värjättyjä linsejä. Nämä poistavat absorboimalla saapuvasta valosta tarpeettoman osan ja toimivat siten kaistanpäästösuolettimina. Näillä voidaan määrittää tietty aallonpituus, jolla kohde halutaan valaista ja rajata kennolle



Kuva 12: Minitabilla simuloidut normaalijakaumat piin ja metalloinnin harmaasävyarvoista välillä 0, 255. Musta yhtenäinen viiva edustaa piin harmaasävyarvoa ja punainen katkoviiva metalloinnin harmaasävyarvoa. Musta pystyviiva kuvaa koneellista GV-erottelua piin ja metalloinnin välillä. Kuvassa A) on simuloituna suodatetun kuvan harmaasävyarvojen jakauma. Kuvassa B) on simuloituna suodattamattoman kuvan harmaasävyarvoja. Kuvassa metalloinnin harmaasävyarvo rajoittuu maksimiin, eli 255 GV:hen. Kuvasta nähdään se, miten metalli- ja piialueet sekoittuvat normaalijakaumien ääripäistä keskenään.

heijastuvaa valoa spektrin hyödyllisimmästä osasta. Tämä lisää kontrastia tutkittavien osien välille [9]. Suodattimet voivat myös olla alipäästö-, ylipäästö- taikka kais-tanestosuodattimia. Absorbointiin perustuvissa suodattimissa tulee tosin huomioida valonlähteen tehotaso, sillä absorboitunut energia muuttuu käytännössä kokonaan lämmöksi [8]. Toinen metodi suodatukseen on käyttää interferenssifilttereitä. Näiden rakenteessa on suodatettavan aallonpituuden mukaan mitoitettuja kaviteetteja, joiden sisäisten heijastusten myötä syntyy destruktiivinen interferenssi juuri kyseiselle, suodatettavalle aallonpituudelle [10]. Koska kaviteetin mitoitus on oleellinen interferenssin kannalta, voidaan taajuusriippuvuutta säätää kääntämällä suodatinta optisen akselin suhteen. Tällöin kaviteetin mitoitus muuttuu ja suodatettava aallonpituus kasvaa. Tämä ominaisuus tulee myös huomioida systeemiä suunniteltaessa, sillä lämpölaajeneminen aiheuttaa jossain määrin myös saman ilmiön. [8]

## 2.4 Sensorit

Sensorien tehtävä on pääpiirteissään yksinkertainen: vastaanottaa fotoni, muuttaa se varaukseksi, säilyttää varaus siinä pikselissä mihin se ilmestyi sekä siirtää tämä varaus luettavaan muotoon, esimerkiksi jännitteeksi [11]. Tässä kappaleessa käsitellään yleisesti sensorien toimintaa sekä sitä, miten ne vaikuttavat systeemitasolla.

Optiikka valitaan siten, että kameran sensorille saadaan sopiva suurennos tutkitavasta kohteesta sekä riittävä fokuksen syvyys riippuen tarvittavasta valotusajasta. Valaistuksella taas on tarkoitus luoda mahdollisimman suuri kontrasti kiinnostavien

asioiden välille. Sensori valitaan siten, että sillä saadaan mahdollisimman paljon kerättyä informaatiota luodusta kuvasta tehokkaasti sekä nopeasti. Nämä vaatimukset ovat usein ristiriidassa keskenään, joten sensorin valinnassa joudutaan usein tekemään kompromissi. Vaihtoehtoisesti voidaan tehdä muutoksia optiikkaan tai valaistukseen, mutta niiden muuttaminen vaatii usein enemmän työtä järjestelmätasolla. [8]

Fotodiodit luovat eri kennorakenteiden perustoiminnon, fotonien muuntamisen elektroneiksi. Useimmiten tämä toteutetaan yksinkertaisilla p-n diodeilla. Estosuuntaisella jännitteellä luodaan *tyhjennysalue*. Fotonit, jotka muuntuvat varauksiksi, eivät voi jäädä tyhjennysalueelle pysyvästi vaan siirtyvät siitä pois, mikä havaitaan virtana. Kuvasensorit eivät perustu jatkuvalle virralle, joten fotodiodin anodiin liitetään kytkin, jolla tyhjennysalueelle kertyneet varaukset voidaan purkaa ja lukea virtana tai vaihtoehtoisesti juuri ennen kytkimen sulkemista jännitteenä. Tyhjennysalueen sallima maksimivaraus sekä pikseliin liittyvä kohina muodostavat pikselin vasteen dynaamisen alueen. [8] [11]

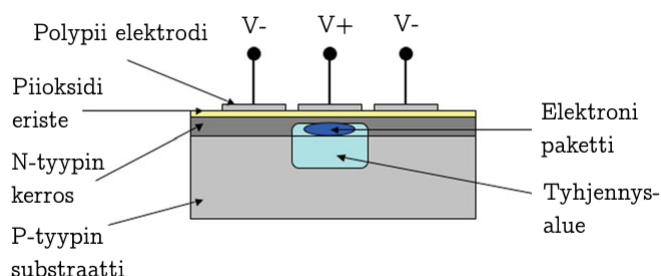
Kaikilla digitaalisilla kameroilla fotonit absorboituvat fotosensitiivisiin rakenteisiin, josta syntyy fotoelektroneita. Absorboituminen on vahvasti taajuusriippuvaa eri materiaaleilla, josta syntyy erisuuruiset *kvanttitehokkuudet* eri aallonpituuksille. Kvanttitehokkuudella tarkoitetaan suhdelukua sensorille saapuneiden fotonien muuntamisesta elektroneiksi. Vasteeseen vaikuttavat lukuisat tekijät, kuten kennon materiaali, sensorialueen paksuus, pinnoitemateriaalit, hilan paksuus sekä potentiaallikaivon suuruus. [11]

Sensorien pikselimäärä määräytyy fotoneita elektroneiksi muuntavien rakenteiden perusteella. Ne ovat siis näytepisteitä, joista lopullinen kuvamatriisi luodaan. Useampi sensorin pikseli voi muodostaa yhden dataelementin, jota yleisesti nimitetään pikseliksi [11]. Pikselikoko kuvaa yksittäisen pikselin fyysistä kokoa ja pikselijako niiden keskipisteiden etäisyyttä toisistaan. Nämä parametrit ja linssin ominaisuudet luovat systeemin *resoluution*, jolla tarkoitetaan erottelukykä, eli pikselien määrää pituusyksikköä kohden. Toinen resoluution määritelmä on pikselien määrä vaakasuunnassa kerrottuna pystysuunnan pikselien määrällä. [8]

### 2.4.1 CCD

CCD-kennon (Charge-Coupled Device) yksittäisen pikselin varaus syntyy MOS-kondensaattorista (Metal-Oxide-Semiconductor) tai vaihtoehtoisesti fotodiodista. Varauksen tallennus ja siirto taasen perustuu *potentiaallikaivoihin*. Saapuvat fotonit muodostavat aukko-elektronipareja, joista positiivisesti varautuneet aukot siirtyvät negatiivisesti kytketyille elektrodeille kun taas elektronit kasaantuvat positiivisesti varautuneen elektrodin alle, mutta eivät eristekerrokselle asti. Tekniikka on havainnollistettu kuvassa 13. Elektroneita voi kertyä siihen asti, kunnes niiden muodostama negatiivinen varaus on yhtä suuri kuin kytketty positiivinen jännite. Tämän jälkeen systeemi on saturoitunut, määritellen yksittäisen pikselin dynamiikan ylärajan. Jos

pikseliä valotetaan saturaation ylitse, varaukset alkavat vuotamaan ympärille oleviin pikseleihin. [11]



Kuva 13: CCD-kennoissa käytetty potentiaalikanavo. Kaivon kyky ylläpitää varaus luodaan jännitteellä V+. Näiden rakenteiden muodostamasta alueesta syntyy pikselimatriisi. [8]

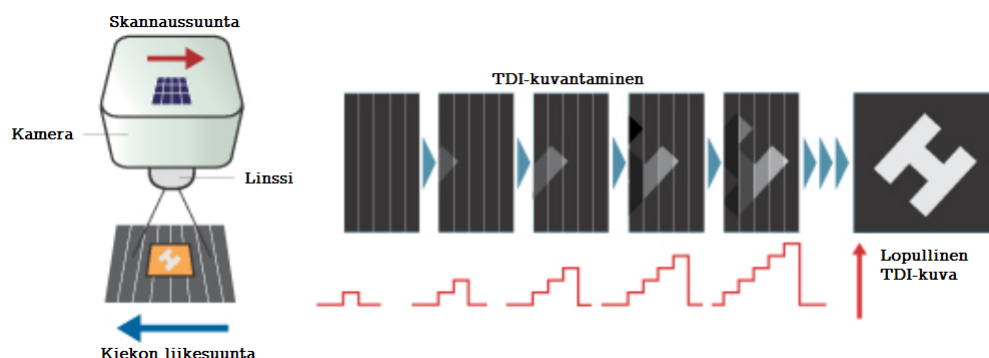
Valotuksen ajan kennon pikselit varautuvat. Valotuksen jälkeen varaukset siirretään pikseli ja pikselirivi kerrallaan potentiaalikanavien jännitteillä ohjaten. Tämänkaltaista menetelmää kutsutaan *siirtorekisteriksi*. Yksinkertaisimmassa kolmivaiherekisterissä yksittäisten varauspakettien välillä on kaksi varauksista tyhjää aluetta, jotka estävät varauspakettien sekoittumisen keskenään missään vaiheessa siirtoa. Suuremman resoluution kennoissa käytetään kaksivaiherekistereitä, jolloin varauspakettien väliin jää vain yksi tyhjä kaivo. Näiden rinnakkaisrekistereiden tärkein ominaisuus on mahdollisimman hyvä tehokkuus pikselien siirrossa, sillä siirtojen muodostamat häviöt vähentävät eksponentiaalisesti rekisterissä viimeisenä olevien pikselien tuottamaa vastetta. Toinen ongelma liittyy valotukseen, sillä kirkas valaistus voi tuottaa häiriötä myös lukuvaiheessa, jolloin kuvaan muodostuu pystysuuntainen kirkas viiva. Tämän välttämiseksi on kehitetty monimutkaisempia kennoja, jotka siirtävät lukuvaiheessa kaikki varaukset yhdenaikaisesti identtisesti kennorakenteelle. Se on sijoitettu suojaan valolta, joten riski edellä mainitulle häiriölle saadaan poistettua. Tämä tosin lisää kennorakenteen monimutkaisuutta merkittävästi. [11]

Nämä yksittäiset siirtorekisterit yhdistyvät lopulta yhteen rinnakkaisrekisteriin, joka siirtää varaukset kondensaattorille. Kondensaattori on kytketty operaatiovahvistimeen, jolloin kokonaisuus toimii signaalin derivaattorina. Tällä toteutetaan siis varauksen muutos operaattorin ulostuloon jännitepulssiksi. Rinnakkaisrekisterit ja siirtorekisterit voidaan molemmat jakaa pienempiin osiin, jolloin varauksien lukeminen ulos nopeutuu merkittävästi. Tätä kutsutaan segmentoimiseksi. [8] [11]

### 2.4.2 TDI-kuvantaminen

Laajojen alueiden nopeaan kuvantamiseen käytetään niin sanottua TDI-teknologiaa (Time Delay Integration). TDI-kuvaus on eräänlainen valokuvauksen ja videokuvauksen hybridimuoto. Kameran CCD-kenno rekisteröi jatkuvasti kohteesta useita kymmeniä pikselirivejä kerrallaan dataa. Pikselirivien skannaustaajuus ja liikkuvan kuvauskohteen nopeus ovat identtiset. Tämä mahdollistaa sen, että pikselirivit voidaan jokaisen syklin jälkeen summata edelliseen asteeseen. Summaus tuottaa lisää dataa ja mahdollistaa täten suuremman intensiteetin kuvaan, mahdollistaen matalan valaistustehon ja poistaen tarpeen salamavalolta. Kuvantamisen toimintaperiaate on nähtävillä kuvassa 14. [8] [16]

TDI menetelmänä vaatii kuitenkin toimiakseen kuvaussysteemiltä lukuisia asioita. Ensinnäkin, optiikan tulee olla mahdollisimman vapaa aberratioista. Muutoin pienetkin epäideaalisuudet toistuessaan tuottavat huomattavan määrän kohinaa, etenkin kuvan reunoilla. Kennon ja kuvannettavan objektin liikkeen tulee olla yhden-suuntaisia koko kuvausalueen yli sekä niiden välisen etäisyyden tulee pysyä vakiona. Lisäksi hyvin pienikin tärinä tekee kuvantamisen mahdottomaksi, eli laitteella tulee olla hyvä mekaaninen vaimennus. Kuvannuksen kannalta on myös välttämätöntä, että kennon rivien lukunopeus on synkronoitutuu tarkasti kuvannettavan kappaleen nopeuteen nähden. [8]



Kuva 14: TDI-kuvantaminen havainnollistettuna. Samasta alueesta otetaan useampi limittäinen kuva, jotka summataan yhteen yhteisen pikseliviivan omaavilta alueilta. Tällöin saadaan korkea kontrasti sekä nopea kuvantaminen matalilla valon intensiteettitasoilla.

### 2.4.3 CMOS

CMOS-kennolla (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) yksittäisen pikselin valoa vastaanottava alue toimii samalla tavalla kuin CCD-kennoilla. CMOS-nimitys

juontuu siitä, että fotodiodin tuottamaa vastetta luetaan ja ohjataan CMOS-transistoreilla. Ohjaavien transistorien määrän perusteella CMOS-kennot jaetaan 2T-5T+ luokkiin, joissa T kuvaa transistorien lukumäärään fotodiodia kohden. Tyypillisimmillä 3T-kennoilla varaus luetaan pikseli kerrallaan. 3T-rakenteella ei voida kuitenkaan säilyttää varausta, mikä tarkoittaa sitä että pikselien valotusaika kasvaa viimeisiä luettavia pikseleitä kohti. Tätä menetelmää ei siis voida käyttää nopeasti liikkuvia kohteita kuvattaessa, sillä muutoin liike muodostaa vääristymiä kuvaan. Transistorien määrää lisäämällä voidaan lisätä kyky tallentaa varaus synkronoidusti kaikista alueista, jolloin ongelmasta päästään eroon. Lisäksi transistorien lisäys entisestään mahdollistaa fotodetektorin kytkennästä johtuvan kohinan monitoroimisen, jolloin se saadaan poistettua lopullisesta mittauksesta kasvattaen pikselin dynaamista aluetta. Transistorien määrän lisääminen tosin kasvattaa pikselikokoa, mikä vähentää sekä resoluutiota että CMOS-kennojen määrää piikiekolla vaikuttaen hintaan. CMOS-kennojen etuna on lähinnä edullinen hinta sekä kyky lisätä muitakin toiminnallisuuksia kennon sisältämään piisruun. [8]

#### 2.4.4 Värikamera

Värillisen kuvan luomiseen tulee erottaa toisistaan riittävä määrä värisävyjä, jotka tyypillisesti ovat päävärit eli sininen, vihreä ja punainen. Tämä voidaan tehdä usealla eri tavalla. Eri aallonpituuksille on yksilöllinen tunkeutumissyvyys piihin, joka kasvaa aallonpituuden funktiona. Tämän ja hieman poikkeavien piin seostussuhteiden avulla voidaan potentiaalikanavo jakaa kolmeen, eri aallonpituuksien kanssa reagoivaan osaan. Tällöin yksi pikseli pystyy luomaan riittävän määrän informaatiota värillisen pikselin generoimiseen, jolloin kennon pinta-ala saadaan tehokkaasti hyötykäyttöön. Menetelmä on kuitenkin kallis ja siinä ilmenee herkästi epähomogeenisuutta pikselien herkkyyyden välille. [11]

Käytännöllisempi keino on kuitenkin jakaa valkoinen valo osiin värisuodattimilla. Tämä voidaan tehdä joko yksi- tai monikennoisena toteutuksena. Ysikennoisessa toteutuksessa kennon päällä on kolmivärinen suodatin, joka yleensä koostuu toistuvista pääväreistä. Yksi RGB-pikseli (Red Green Blue) koostuu yhdestä punaisesta ja sinisestä sekä kahdesta vihreästä pikselistä, joiden vaste keskiarvoistetaan. Vihreä pikseli on matriisissa korostettuna siksi, että ihmisen näköaisti tuottaa suurimman vasteen vihreän valon aallonpituudella. Suodatuksen vuoksi kaikkien pikselien vastaanottamasta valotehosta häviää 75 % verrattuna musta-valkokameraan. Monikennoisessa toteutuksessa säteet jaetaan monimutkaisella optisella peilisuodattimella, jolloin jokaiselle yksittäiselle kennolle saapuu vain tiettyä aallonpituutta. Tällöin valoteho kennoa kohden on vastaava kuin musta-valkokameroissa, lukuunottamatta pieniä häviöitä optiikassa. Kaikki menetelmät väri-informaation luomiseksi lisäävät siis monimutkaisuutta ja hintaa, joten värikameran käyttöön on oltava hyvin painavat perusteet, sillä useimmissa konenäkösovelluksissa musta-valkokuvan sisältämä data on riittävää. [8] [11]



## 2.5 Tarkastusalgoritmit

Kuvan kritisointimetodit voidaan karkeasti jakaa kolmeen eri luokkaan: pikseliarvoihin perustuviin laskuoperaatioihin, referenssikuvaan vertaamiseen tai pikselidatan suodatukseen perustuviin menetelmiin. Lisäksi joissain laitteissa on ominaisuuksia näistä kaikista metodeista, jolloin on mahdollista hyvin moniulotteisesti ratkoa erinäisiä ongelmia. Yleisesti ottaen referenssiin perustuvat metodit kuluttavat paljon laskentatehoa, mutta ovat hyvinkin helposti otettavissa käyttöön useille erilaisille tarkastuksille. Laskuoperaatioihin perustuvissa menetelmissä suodatetaan laskennallisilla operaatioilla haluttu alue esiin, jonka perusteella voidaan päättää täyttävätkö kyseisen yksinkertaistetun kuvion ominaisuudet, kuten pinta-ala tai sijainti, tuotteen spesifikaation asettamat vaatimukset. Pikselidatan reaaliaikainen suodatus ja kritisointi on menetelmistä ylivoimaisesti nopein sekä hyvin epäherkkä valaistuksen muutoksille, mutta vaatii monimutkaisempia algoritmeja sekä kykenee erottamaan vain tietynlaisia, menetelmästä riippuen, pistemäisiä tai viivamaisia defektejä [3]. MEMS-tuotteita ajatellen kiinnostuksen kohteena on monenlaisia defektejä, joten AVI-laitteen tulee venyä useaan erillaiseen tarkastukseen.

Konenäkösovelluksissa käytetään useita erilaisia kuvankäsittelyoperaatioita. Näiden tarkoitus on parantaa kontrastia tutkittavien asioiden välillä sekä lopulta halutaan usein kvantisoida kuva kokonaan mustaksi ja valkoiseksi. Tällöin saadaan yksiselitteisesti erotettua esimerkiksi tausta ja oletettu defekti toisistaan. Karkeasti ottaen operaatiot jaetaan pikselikohtaisiin sekä pikseliin ja sen ympäristöön verrannollisiin operaatioihin. Useimmissa sovelluksissa pikselit saavat 8-bittisen lukuarvon nollan ja 255:n väliltä, joihin voidaan toteuttaa laskennallisia operaatioita. Näitä operaatioita tutkitaan seuraavaksi muutaman esimerkin avulla. [8]

*Pikselioperaatioissa* toteutetaan kaikkiin alueen pikseleihin sama operaatio. Harmaasävyarvolle voidaan suorittaa lineaarisia kerto- ja jakolaskuoperaatioita. Jokaiseen pikseliin voidaan myös toteuttaa summa- ja vähennyslaskuoperaatioita. Näitä funktioita voidaan käyttää esimerkiksi haluttujen alueiden saturoimisessa tai valaistustason muuttuessa harmaasävyjakauman ohjelmalliseen muuntamiseen lähemmäs haluttua tasoa. Lisäksi joissain tapauksissa voi olla hyödyllistä skaalata pikseliarvot logaritmiseen tai eksponentiaaliseen muotoon. Ehkä tärkeimmät pikselikohtaiset operaatiot ovat kuitenkin yli- ja alipäästösudatukset, joita yhdistämällä voidaan toteuttaa kaistanpäästö ja kaistanesto. Näillä tarkoitetaan siis kuvan pikselien binärisointia operaatioon asetettavaan raja-arvoon nähden, jonka jälkeen kuvassa on enää jäljellä mustia ja valkoisia pikseleitä, muodostaen helposti erotettavia alueita. [17]

Toinen hyvin merkittävä tapa käsitellä kuvaa on pikselin ja sen ympäristöön perustuvat muunnokset, eli *pikselimatriisioperaatiot*. Niissä muodostetaan yhtälö keskimmaiselle pisteelle, jonka muuttujina toimivat keskimmäisen pikselin ympärillä olevat pikselit. Näillä menetelmillä saadaan hyvin vahvasti korostettua esimerkiksi rajapintoja ja suodatettua pois kuvantamistekniikasta syntyviä häiriöitä. Näitä käytettäessä tulee muistaa tosin se, että informaatiota katoaa kuvaa manipuloides-

sa. Tämä ei kuitenkaan yleensä ole merkityksellistä, sillä operaatioiden tarkoitus on yleensä korostaa vain yhtä ominaisuutta kerrallaan, ja seuraavia ominaisuuksia korostettaessa palataan taas alkuperäiseen kuvaan. Näiden toimintaa on selkeintä havainnollistaa 3x3 pikselimatriisilla kuten kuvassa 15.

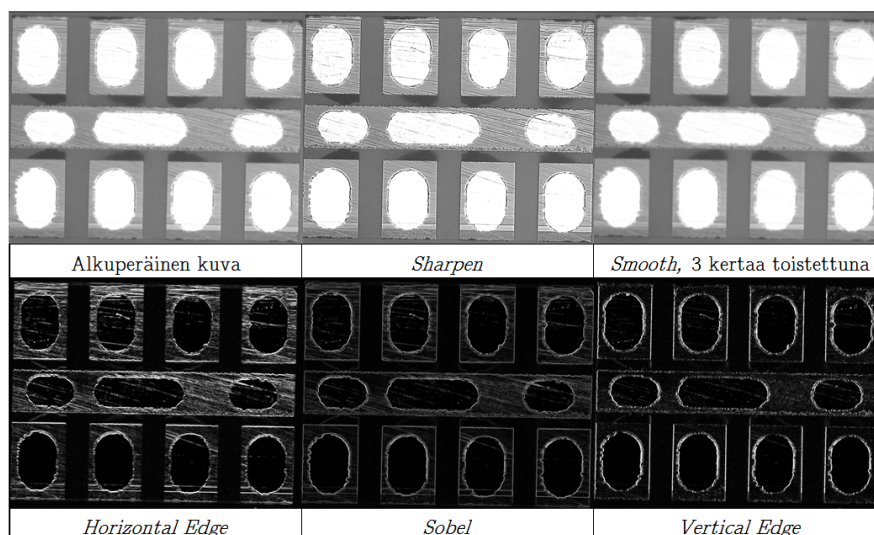
A(W1)	B(W2)	C(W3)
D(W4)	E(W5)	F(W6)
G(W7)	H(W8)	I(W9)

Kuva 15: 3x3 pikselimatriisi. Kirjainindeksit A-I kuvaavat pikseleiden arvoja alkuperäisessä kuvassa, W1-W9 kuvaavat mahdollisia painokertoimia muunnokselle.

Pikselimatriisi voi myös olla 5x5, 7x7 tai jopa 11x11 pikselin kokoinen, mutta useimmat operaatiot toimivat siten, että pienimmän matriisioperaation toisto tuottaa saman lopputuloksen kuin isomman matriisioperaation käyttö. Pikselimatriisin ulostulo keskimmäiselle pikselille voidaan esittää seuraavassa muodossa 3x3 matriisille:

$$E = k_1(AW1 + BW2 + CW3 + DW4 + EW5 + FW6 + GW7 + HW8 + IW9) + k_2, \quad (7)$$

jossa  $W1 - W9$  kuvaavat painokertoimia eri pikseleille,  $A - I$  pikseleiden arvoja ja  $k_1$  ja  $k_2$  ovat pikselin lopullista skaalausta varten laskettavat normalisointikertoimet. Yhtälöstä painokertoimia muokkaamalla saadaan muokattua kuvaa halutulla tavalla. Esimerkiksi asettamalla painokertoimet  $W2$ ,  $W5$  ja  $W8 > 0$  ja muut kertoimet nolliksi pystysuuntaiset piirteet pysyvät samoina tai vahvistuvat ja muut piirteet sumentuvat. Painokertoimia muuttamalla riveittäin tai sarakkeittain voidaan siis vahvistaa tietyssä suunnassa olevia piirteitä. Normalisointikertoimet lasketaan pikselimatriisin yksilöiden keskiarvoista, jolloin lopulliset arvot saadaan skaalattua 8-bittisiksi. Näitä niin kutsuttuja *lineaarisia pikselioperaatioita* useassa tapauksessa käyttökelpoisempia ovat *epälineaariset pikselioperaatiot*, joita on lukuisia. Usein ne keskittyvät rajapintojen korostamiseen tai häiriöiden poistoon. Muutamana esimerkkinä mainittakoon ensinnä *maksimioperaattori*, joka valitsee aina suurimman pikseliarvon pikseleistä  $A - I$ , ja asettaa sen keskimmäisen pikselin tilalle. Tämä saa yleensä kirkkaina näkyvät murtumat tai reuna-alueet vahvistumaan. Toisaalta taas häiriöiden poistoon voidaan käyttää *mediaanioperaatiota*, joka valitsee viidenneksi suurimman pikseliarvon tutkittavasta pikselimatriisista. Tämä poistaa kirkkaat pistemäiset häiriöt ja muutoinkin tasaa kuvan histogrammia. Asioiden tunnistamisen kannalta on oleellista, että resoluutio kuvassa on riittävä, sillä muutoin kuvakäsittely voi johtaa kiinnostavan datan katoamiseen. Lisäksi osa pikselin ympäristöön tehtävistä operaatioista ei toimi kuvan reunoilla puuttuvien pikseleiden vuoksi, joten analysoitava alue on lisäksi syytä määrittää tarkoituksenmukaisesti. [8] [17]

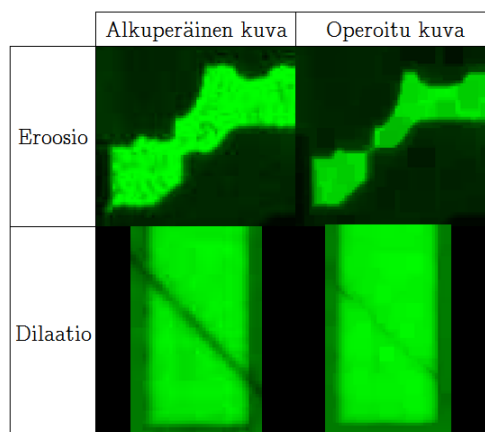


Kuva 16: AVI:n ohjelmistosta valittu muutama oleellinen pikselimatriisioperaattori. Kuvassa on kolmiakselinen kiihtyvyyssanturi, jonka sahauspinta on tarkastettavana. *Sharpen* terävöittää kuvaa kontrastia kasvattamalla, joka näky sahausurien vahvistumisena. *Smooth* taas keskiarvoistaa kuvaa, jolloin sahausurat katoavat kauttaaltaan, tehden esimerkiksi reunahauista luotettavampia. *Horizontal Edge* ja *Vertical Edge* vahvistavat pysty- ja vaakasuuntaisia piirteitä. *Sobel* korostaa kaikkia yhtenäisiä korkean kontrastin alueita. Sahauspinnan epätasaisuus muodostaa huomattavia haasteita sopivien käsittelyoperaatioiden valitsemisessa.

Kuvassa 16 on esitetty visuaalisesti MFI:n tuotteella muutama tyypillinen pikselimatriisioperaattori. Esimerkiksi reunojen korostamiseen on kehitetty useita kymmeniä erilaisia operaatioita, joiden soveltuvuutta yksittäisiin tarkastuksiin tulee iteratiivisesti kokeilla.

Muita oleellisia operaattoreita ovat *dilaatio* ja *eroosio*. Eroosiolla kasvatetaan mustaa aluetta halutulla pikselimäärällä jokaiseen suuntaan, jolloin valkoiset alueet pienenevät ja ohuet valkoiset alueet voivat hävitä kokonaan. Tällöin saadaan esimerkiksi suodatettua pois pitkät valkoiset ohuet naarmut kuvasta tai selvitettyä, mikä on pienin läpimitta jollain tutkittavalla alueella. Tämä operaatio poistaa pikseleitä vähemmän diagonaalisilta piirteiltä kuin pysty- ja vaakasuunnassa olevilta piirteiltä, mikä tulee huomioida tarkastusalueita määritellessä. Nämä operaatiot on demonstroitu kuvassa 17. [17]

Symmetristen kuvien muuntaminen on laskennallisesti tehokasta ja tapauskohtaisesti voi saada defektit erottumaan hyvin tehokkaasti kuvasta. Eräs tällaisista muunnoksista on Fourier-muunnos. Digitaalisista pikseleistä koostuvan kuvan muuntamisessa taajuustasoon kutsutaan diskreetiksi Fourier-muunnokseksi. Sillä voidaan käsitellä kaksiulotteinen kuva jakamalla se pysty- ja vaakariveiksi, jotka Fourier-muunnetaan yksitellen. Tällöin kuva muutetaan amplituditasosta taajuustasoon,



Kuva 17: CAVI:n ohjelmistosta esiteltynä eroosio- ja dilaatio-operaatiot eräissä sovelluskohteissa. Ylemmässä kuvassa on johdin, johon on prosessointivaiheessa tullut vaurioita. Tällöin eroosion avulla saadaan syövytettyä johdinta kaikista suunnista, jota toistamalla saadaan johdin virtuaalisesti katkeamaan ohuimmasta kohdastaan. Alemmassa kuvassa dilaation avulla on kiekon hionnasta syntynyt ohut ja merkityksetön naarmu lankabondausalueella häivytetty lähes kokonaan. On huomionarvoista, että dilaation avulla tehty suodatus saattaa peittää alleen haitallisiakin defektejä.

jolloin saadaan informaatiota jota muutoin on vaikea tai laskennallisesti työlästä havaita. Erityisesti toistuvista kuvioista saadaan hyvin tehokkaasti erottumaan poikkeavuudet Fourier-muuntamalla referenssikuvaa, joka vähennetään tutkittavan kuvan Fourier-muunnoksesta. Tällöin lokaalit poikkeavuudet saadaan näkyviin säännöllisesti toistuvasta taustasta. [8] [18]

### 3 MEMS-anturit

MFI:n osaaminen keskittyy MEMS-antureiden suunnitteluun ja tuotantoon. Asiakaisiin kuuluvat pääasiassa autoalan järjestelmätoimittajat ja terveysteknologia. Erityisesti autoala vaatii yhdistelmäantureita, joilla on kyky mitata sekä kiihtyvyyttä kolmeakselisesti että kulmakiihtyvyyttä z-akselin suhteen. Näitä suureita mittaamalla ja hyödyntämällä voidaan esimerkiksi kehittää autoihin ajonvakautusjärjestelmiä, lukkiutumattomia jarruja sekä mäkilähtöavustimia, joita kehittyneissä maissa lainsäädäntö jopa osittain vaatii uusilta autoilta. [19]

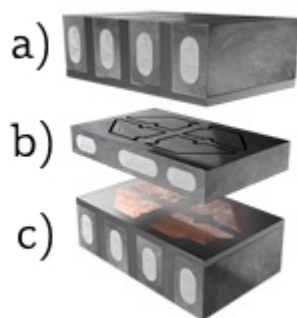
Tässä kappaleessa käydään lyhyesti läpi eri anturityyppien toimintaperiaatteet. Sen jälkeen perehdytään automaattisen visuaalisen tarkastuksen kannalta mielenkiintoisiin prosessivaiheisiin.

#### 3.1 Anturien mittausperiaate ja lopputuotteet

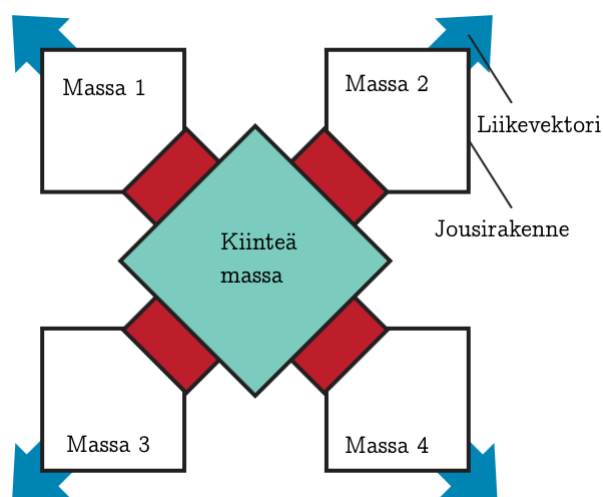
Kiihtyvyyksien mittaus perustuu elementin sisällä liikkuviin massa- ja jousirakenteisiin, jotka sijaitsevat ulkoisen kiihtyvyyden muodostaman voiman vaikutuksesta vaihtelevalla etäisyydellä kiinteistä elektrodeista. Liikkuvien rakenteiden ja kiinteiden elektrodien välille syntyy etäisyydestä riippuva kapasitanssi, johon koko anturien toiminta perustuu. Teknologiasta riippuen elektrodit ovat joko rakennekiekolla olevia kampaelektrodeja tai kansikiekoilla olevassa kaviteetissa. Kaikki liike voidaan mallintaa kuuden suureen avulla, joita ovat toisiinsa nähden ortogonaaliset X, Y ja Z-suuntaiset kiihtyvyydet sekä näiden akselien ympäri tapahtuvat kulmakiihtyvyydet. [19]

Kuvassa 18 esitetty kolmiakselinen kiihtyvyysanturi omaa neljä elektrodiparia. Neljän elektrodiparin käyttö kolmen sijaan tuo ylimääräisen mittausakselin, joka mahdollistaa korkeamman vapausasteen mittaamiselle. Mittauksen toimintaperiaate on havainnollistettu kuvassa 19. Vasta-elektrodit sijaitsevat alemmalla rakennekiekolla olevassa kaviteetissa. Kaviteetin syvyys on tarkasti kontrolloitu kehittyneiden etsaus-, kiillotus ja hiontaprosessien avulla, jotta elektrodien välinen etäisyys pysyy eri kiekkojen välillä mahdollisimman tasaisena. Tämän etäisyyden kontrollointi on tärkeää, sillä se määrää elementin ulostulon dynamiikan. [19]

Kulmanopeusantureiden eli gyroskooppien toiminta poikkeaa taas hieman kiihtyvyysantureiden toiminnasta. Coriolis-ilmiö aiheuttaa näennäisen voiman, joka voidaan mitata asettamalla elementin massa resonanssiliikkeeseen, jota kulmakiihtyvyys poikkeuttaa. Tämän coriolisvoiman, liikkuvan massan ja massan nopeuden perusteella voidaan laskea toteutuneen kulmanopeuden estimaatti. Tämän tyyppinen mittausasetelma on yleensä äärimmäisen herkkä värinän ja lämpölaajenemisen muodostamalle offsetille tilassa, jossa kulmakiihtyvyyttä ei ole. Tätä varten MFI:llä on kehitetty uniikki ratkaisu tähän ongelmaan kvadratuurikompensoinnin kautta [19] [21]. Tämä menetelmä on pyritty havainnollistamaan kuvassa 20.

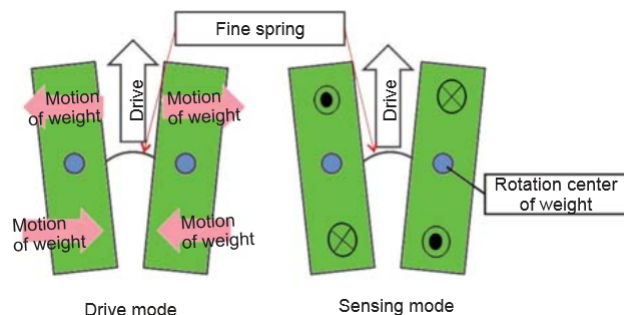


Kuva 18: Kiihtyvyysanturielementti. Kuvasta nähdään tuotteen a) kansi, b) rakenneosa ja c) ja pohja. Rakenneosan massat muodostavat liikkeeseen verrannollisen kapasitanssin pohjan elektrodeja vastaan. Näin saadaan elementti suljettua hermeettisesti. [20]



Kuva 19: Kiihtyvyysanturin toimintaperiaate, liikevektorit osoittavat alaviistoon. Massojen alapuolella sijaitsevat kapasitanssia mittaavat elektrodit. [19]

Elementeissä sijaitsevat liikkuvat jousitetut massat on poikkeuksetta suljettu elementin sisälle. Elementin kannessa on lasieristeillä erotettu läpiviennit rakennekiekolle. Lasi toimii erittäin tehokkaana eristeenä elektrodien välillä sekä mahdollistaa vain hyvin vähäisen parasiittisen kapasitanssin. Tämä parantaa signaali-kohinasuhdetta, lisäksi tuotteen tarkkuutta, stabiilisuutta sekä laskee virrankulutusta. Liikkuvien rakenteiden sulkeminen erillisellä kansikiekolla mahdollistaa partikkelivapaan tilan sekä ylläpitää stabiilin kaasukonsentraation elementin sisällä. Tämä on hyvin tärkeää, sillä gyroskooppien liikkuvia rakenteita ajetaan resonanssitaajuudella, joka riippuu massaa ympäröivästä kaasusta [22]. Lisäksi kannelta saadaan hyvin vapaasti tuotua läpiviennit, joka takaa elementin suunnittelun joustavuuden. [19]



Kuva 20: Gyroskoopin toimintaperiaate. Massoja ajetaan toisiinsa nähden  $90^\circ$  vaihe-erossa, joka on havainnollistettuna kuvan vasemmassa laidassa. Kuvan oikeassa laidassa ristin ja ympyrän muotoiset alueet kuvaavat kapasitanssin mittauspisteitä. Tällä nelipistemittauksella ja ASIC:in tekemällä signaalin suodatuksella saadaan haluttu coriolisvoima mitattua ja erotettua kohinasta. [19]

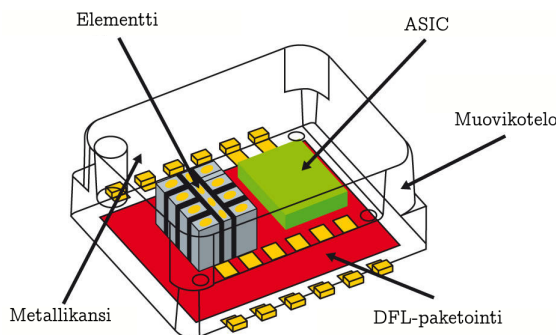
Kapasitiivinen anturi itsessään ei ole vielä valmis tuote, vaan sitä ohjaamaan ja sen signaaleja käsittelemään tarvitaan mahdollisimman lähellä oleva ASIC-piiri, sillä muutoin pieni kapasitiivinen signaali anturilta katoaa ympäristön tuottamiin häiriöihin. Lisäksi gyroskooppien ohjaamiseen tarvitaan oma järjestelmänsä.

Lopputuotteet eli komponentit koostuvat ASIC:sta, tuotetyypistä riippuen joko kiihtyvyysanturista tai gyroskoopin ja kiihtyvyysanturin yhdistelmästä. Nämä liimataan esivalettuun koteloon, jonka jälkeen lankabondauksilla yhdistetään ASIC-piirit ja elementit sekä ASIC:ien ulkoiset liitännät koteloinnin jalkoihin. Koko systeemi täytetään tämän jälkeen geelillä, jonka tarkoitus on suojata tuotteita ympäristön aiheuttamilta haitallisilta kemiallisilta reaktioilta sekä elementtiä ja siihen yhdistettyjä kultaanjohtajia ulkoisilta häiriöiltä, kuten tärinältä ja kovilta iskuilta. Kuvassa 21 on esitetty eräs kiihtyvyyttä mittaava komponentti. [23]

### 3.2 Elementtivalmistus

Elementtivalmistus koostuu lukuisista prosessivaiheista, ja sen lähtömateriaalina on johtavaksi seostettu p-tyypin pii. Piikiekot kulkevat useiden prosessivaiheiden läpi, joista suurin osa on perinteisiä puolijohdeteollisuuden prosesseja. Lisäksi MEMS-valmistukseen on kehitetty muutamia uniikkeja prosesseja. Niistä visuaalisen tarkastuksen kannalta merkittävimpiin eli bondauspäiden valmistukseen liittyvät ohutkalvoprosessit sekä elementtisahaus käydään hieman tarkemmin läpi.

Muratalla valmistettavat kiihtyvyysanturit sekä gyroskoopit koostuvat yleensä kahdesta yhteenliitetystä kiekosta. Niitä kutsutaan *rakennekiekoksi* ja *kansikiekoksi*. Eräillä tuotteilla on myös käytetty niin sanottua pohjakiekkoa, jolla on sama tarkoitus kuin kansikiekoilla, eli sulkea liikkuvat rakenteet hermeettisesti. Nykyiset CSOI-kiekot (Cavity Silicon-on-Insulator) sekä kuivaetsausprosessit ovat kuitenkin



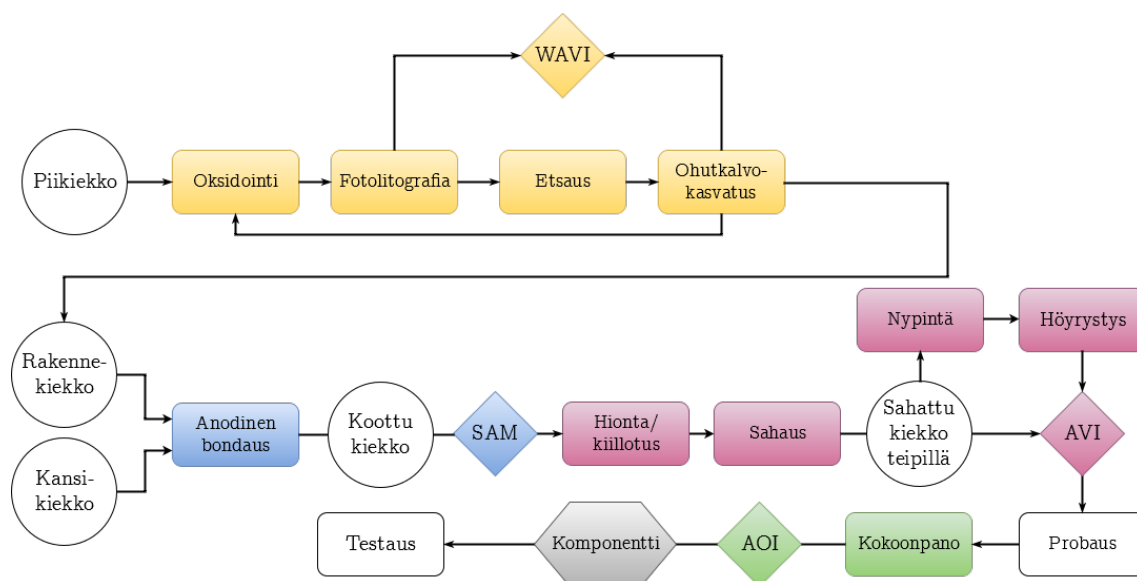
Kuva 21: Paketoitu kiihtyvyysanturi. Vasemmassa laidassa on itse anturi ja oikealla puolella sen kapasitanssia jännitteeksi muuntava ASIC-piiri. Lisäksi piiri suorittaa diagnostiikkaa elementin toimintakunnon varmistamiseksi. Kotelo on täytetty geelillä, jotta ympäristön muuttuvat olosuhteet eivät pääse vaikuttamaan kultalankaliitoksiin elementtien, ASIC:in ja koteloinnin välillä. [23]

syrräyttäneet osittain pohjakiekon tarpeen. MFI:llä elementtivalmistuksen tuotantolinja jaetaan karkeasti kahteen alueeseen, niin sanottuihin front-endiin ja back-endiin. Front-endissä sijaitsevat puhtaamman ympäristön vaatimat kiekkotason prosessit, eli litografia, oksidointi-, etsaus- ja ohutkalvoprosessit. Back-endillä tarkoitetaan kiekkojen hionta- ja kiillotusprosesseja, kansi- ja rakennekiekon yhteenliittämistä eli bondausta, sahausta sekä niin kutsuttuja chippiprosesseja, joissa käsitellään yksittäisiä elementtejä. Back-endin prosessien jälkeen yksittäiset elementit tarkastetaan ensin visuaalisesti, jonka jälkeen ne testataan sähköisesti eli *probataan*, josta ne siirtyvät loppukokoonpanoon. Loppukokoonpanossa elementit poimitaan sahatuilta piikiekoilta tai poimituilta kiekkoilta josta ne liimataan koteloon. Koteloon liimataan myös elementtejä ohjaavat ja kapasitanssia jännitteeksi muuntavat ASIC-piirit. Elementit ja ASIC:it lankabondataan yhteen, jonka jälkeen kotelo täytetään geelimäisellä aineella. Lopuksi komponentille muovataan kansi päälle jonka jälkeen se on valmis lopputestaukseen. Prosessivuo on esitetty pelkistettynä kuvassa 22, keskittyen nimenomaan elementtivalmistuksen osuuteen valmistusprosessista.

### 3.2.1 Sahaus

Sahausprosessissa piikiekolle valmistetut yksittäiset elementit erotetaan toisistaan. Sahausta varten piikiekko laitetaan sahausteipille. Teipin runko on joustavaa materiaalia, jonka pinnalla on liimakerros. Normaalisissa *chippisahauksessa* sahataan koko piikiekon lävitse, sekä muutamia kymmeniä mikrometrejä teippiä. Tällöin teippi muodostaa ehjän alustan erotetuille elementeille. Itse sahausprosessissa erittäin suurella kierrosnopeudella pyörivät terät pysyvät paikoillaan ja kiekko liikkuu terien alla. Terien jäähdyttämiseksi ja sahausjäämien poistamiseksi sahauspinnalle myös suihkutetaan korkealla paineella ionipuhdistettua vettä. Sahauksen jälkeen kiekot laitetaan vielä erilliseen pesuriin, jossa vesisuihkuilla puhdistetaan pyörivästä kiekosta loput jäämät. [24]





Kuva 22: MEMS-prosessivuo yksinkertaistettuna keskittyen automatisoidun visuaalisen tarkastuksen eri käyttöalueisiin. Tarkastuslaitteet eri alueille on eroteltu omilla väreillään. Ylimmällä tasolla on suurpiirteisesti esitetty MFI:n elementtivalmistuksen front-end, jossa suoritetaan kiekkotason WAVI-tarkastuksia (Wafer Automated Visual Inspection) useassa prosessivaiheessa. Back-endin ensimmäisen vaiheen, anodisen bondauksen jälkeen suoritetaan SAM-tarkastus (Surface Acoustic Microscope), jossa tarkastellaan bondausrajapintaa äänisignaalien avulla. Back-endin viimeisenä vaiheena sahattulle kiekolle suoritetaan AVI-tarkastus. Lopulliselle kokoonpanulle lopputuotteelle tehdään vielä AOI-tarkastus (Automated Optical Inspection). Useat tarkastusvaiheet mahdollistavat huonojen kiekkojen tai tuotteiden hylkäyksen jo aikaisessa prosessointivaiheessa sekä antavat tuotantoprosesseille hyödyllistä mittaustietoa.

Sahausprosessin optimointi on haastavaa, sillä terän kulumisen riippuu merkittävästi sahattavasta tuotteesta sekä sen sisältämistä materiaaleista. Materiaalin murtaja myötälujuus tulee ottaa huomioon valittaessa terän materiaalia sekä timanttikiiteiden kokoa. Tämä tarkoittaa sitä, että elementin lasi- ja piialueiden välillä olisi optimaalisinta valita oma terä. Käytännössä tämä ei ole mahdollista johtuen kiekon rakenteesta, mutta joillain tuotteilla voidaan käyttää kaksivaiheista sahausta. Tässä menetelmässä sahataan ensiksi sahausuralta lasialue pois, jonka jälkeen toisella terällä sahataan lasin alla oleva piirakenne.

Visuaalista tarkastusta ajatellen elementtien rakenne on oleellinen tekijä. Elementit jaetaan karkeasti päältä- ja sivustakontaktoitaviin tuotteisiin. Päältäkontaktoitavilla tuotteilla sahanterä kulkee elementin reunoja pitkin, jolloin sahanterä ei vaikuta tarkistettavaan pintaan muutoin kuin elementin reunojen osalta. Sivustakontaktoitavat elementit taas käännetään 90 astetta sahauksen jälkeen, jolloin tarkastetaan sahattua pintaa, jonka karheus ja morfologia on hyvin vaihtelevaa.

Sahauksesta syntyy useita erilaisia defektejä, jotka vaikuttavat tuotteen jatko-  
sessointiin tai luotettavuuteen. Seuraavaksi käydään läpi muutamia merkittävimpiä  
sahauksesta johtuvia defektejä sekä sitä, mikä merkitys niillä on lopputuotteen kan-  
nalta.

Sahauskadun sivuille muodostuu aina jonkin verran murtumia, joiden suunta  
on sahauskatua vasten kohtisuorassa. Murtumien määrään ja kokoon vaikuttavat  
terän ominaisuudet, terän pyörimisnopeus, kiekon liikkumisnopeus, jäähdytys-  
suihkun sijoittuminen sahauskohtaan nähden, terän värähtely poikittaissunnassa sekä terän  
lämpötila [24] [5]. Murtumien vakavuus ja sallittu koko riippuu paljon tuotteesta.  
Tämä yleensä huomioidaan visuaalisen tarkastuksen spesifikaatiossa. Murtuma voi  
esimerkiksi ylettyä metalloinnin alle, jolloin metallointi jää roikkumaan tyhjän päälle.  
Ohut metallointi ei todennäköisesti kestä tätä, vaan voi irrota esimerkiksi kokoonpa-  
nossa ja aiheuttaa täten oikosulkuvaaran. Kuvassa 23a) nähtävä reunamurtuma on  
hylättävä tuote, sillä se rikkoo metalloinnin.

*Hiusmurtumat* ovat kapeita murtumia, jotka etenevät reunamurtumista eteenpäin  
elementin keskustaa kohti. Niitä voi syntyä joko elementin reunasta sisäänpäin taikka  
lasi-piirajapinnasta molempiin suuntiin. Nämä murtumat ovat tavallisia murtumia  
huomattavasti vaarallisempia, koska pii on kova ja hauras materiaali. Lämpölaa-  
jeneminen saa murtuman kasvamaan, jolloin elementin kaviteetin hermeettisyys  
pahimmassa tapauksessa vaarantuu. Lisäksi murtumat ovat pieniä, jolloin niiden  
löytäminen vaatii suurella suurennoksella varustetun mikroskoopin. Nämä ovat auto-  
matisoiduille systeemeille lisäksi erittäin haastavia havaita, sillä elementit joissa tätä  
ilmiötä esiintyy, ovat pääasiassa sivustakontaktoituvia. Näillä tuotteilla sahattava  
pinta on joskus mustanaan sahausuraa ja epätasaisuutta, jonka erottaminen tois-  
tettavasti tummasta hiusmurtumasta on erittäin haastavaa. Kuvassa 23b) on hyvin  
havainnollistettuna kyseinen tilanne mikroskoopilta katsottuna.

*Sahauskura* koostuu irtopartikkeleista, joita sahausurasta irtoaa. Ne sekoittu-  
vat veteen, joka on tarkoitus painesuihkulla puhaltaa pois elementtien päältä ja  
sahausurista prosessin aikana. Jos pesu epäonnistuu, pääsee partikkeleita sisältävä  
vesi kuivuttuaan tiivistymään elementin pinnalle eikä sitä sahauksen jälkeisellä pe-  
sullakaan pystytä saamaan pois. Jäämät ovat epäpuhtauksia, jolloin ne vaikuttavat  
negatiivisesti joko lankabondaukseen tai sivusta kontaktoituvilla tuotteilla bondausa-  
lueiden metallointien höyrystykseen. Jäämä koostuu piistä, piioksideista, lasista, sekä  
elementtivalmistuksen kemikaalijäämistä. [25] [26]

*Pinnankarheus* on ilmiö, jossa sahanterän reunan ja sahattavan pinnan välil-  
le muodostuu poikkeuksellisen karheata pintaa. Tähän vaikuttaa terän lämpötila,  
terää puhdistavan vesisuihkun sijoitus sekä terän kulumisen. Ylimääräinen kar-  
heus on haitallista, sillä se vaikuttaa suoraan lankabondauksien luotettavuuteen  
sivustakontaktoitavilla tuotteilla. Karheus on esitetty kuvassa 23c).



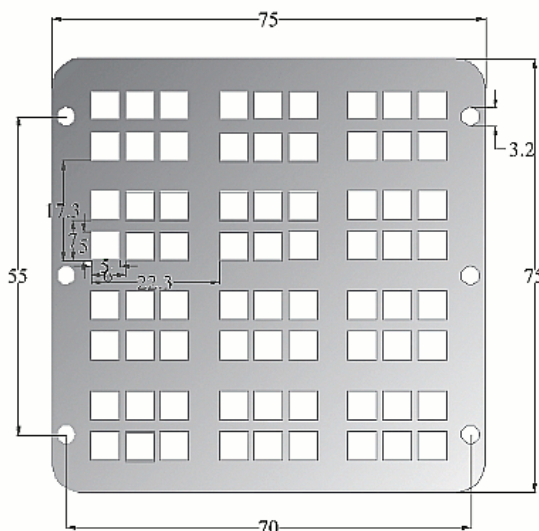
Kuva 23: Kuvia sahausprosessissa muodostuvista defekteistä. a) Halkeama, joka ulottuu lankabondauspädille asti, b) hiusmurtuma sivustakontaktoituvalla tuotteella elementin vasemmassa laidassa ja c) pinnankarheutta pädeillä ja piialueilla. Kuvassa b) nähdään myös oikeassa laidassa sahauksesta johtuvaa tummentumaa, joka ei kuitenkaan vaikuta tuotteen jatko-prosessointiin. Tätä ja pinnankarheutta on haastavaa erottaa toisistaan konenäön avulla.

### 3.2.2 Höyrystys metallointimenetelmänä

Elementeille tulee prosessoida metalliset alueet piin päälle, joka mahdollistaa elementtien lankabondauksen kotelointiin ja ASIC:iin. Metalloinnit valmistetaan ohutkalvokasvatuksella, joka on tuotteesta riippuen höyrystys tai sputterointi. Seuraavaksi katsotaan lyhyesti, miten höyrystysprosessi pääpiirteittäin toimii ja minkälaisia defektejä tästä prosessista voi syntyä. Sputteroinnista syntyvät defektit ovat samankaltaisia, joten tätä prosessia ei avata tarkemmin.

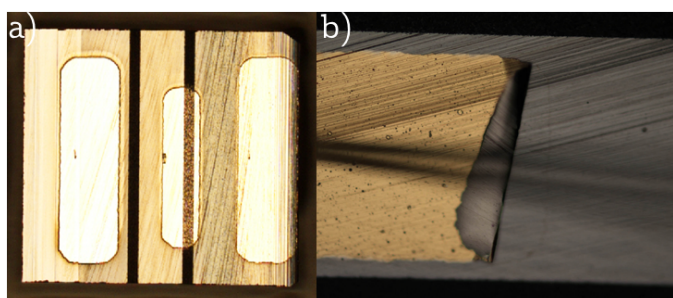
Höyrystyksessä on tarkoitus saattaa haluttu metalli kaasufaasiin, joka tiivistyy höyrystettävälle pinnalle. Höyrystettävän metallin sulatusmenetelmä voi olla teknologiasta riippuen resistiivinen, induktiivinen tai elektronisuihkuun perustuva. Korkeita lämpötiloja tavoiteltaessa vaaditaan yleensä elektronisuihkua. Höyrystimessä on lisäksi oltava voimakas vakuumi, jotta höyrystettäville pinnoille ei tule epäpuhtauksia ja jotta höyrystettävät atomit kulkevat suorassa linjassa kohdealueille. Höyrystettävien pintojen kontaminoituminen joko höyrystysprosessia ennen tai sen aikana johtaa epäluotettavaan kalvon adheesioon. Vakavampi kontaminoituminen johtaa lähes välittömästi höyrystysprosessin jälkeen metallointien kuoriutumiseen, joko osittain reunalta tai kokonaan, kuten kuvassa 25b) on tapahtunut. Piilevämät kontaminaatiot paljastuvat yleensä lankabondauksessa, jossa metalloinnille kohdistuu kohtalaisen suuria voimia bondausprosessin aikana jolloin metallointi saattaa irrota. [26]

Höyrystettävät irtonaiset elementit ladataan kuvan 24 tyyppiseen höyrystysmaskiin, joka peittää elementeiltä pinnat joihin ei haluta metallointia. Maskissa irralliset elementit puristetaan mekaanisesti maskin sivuun, jotta ne pysyvät paikallaan ja kohdistuisivat oikein. Mekaanisten maskien käyttö höyrystysprosessissa tuottaa kuitenkin joitakin epäideaalisuuksia. Maskeihin itsessään tiivistyy myös metallointia



Kuva 24: Mallikuva höyrystysmaskista. Maskiin asetetaan yksittäisiä sahattuja elementtejä, jotka puristetaan maskin sivuun. Kuvassa yksittäisellä elementillä on kuusi yksilöllistä metallointialuetta. [27]

mikä johtaa niissä olevien aukkojen tukkeutumiseen. Tukkeutuminen alkaa maskiaukkojen reunoilta ja etenee keskustaa kohden. Näin ollen metallointialueet pienenevät maskin käyttöiän kasvaessa. Toinen maskitekniikkaan liittyvä ongelma koskee elementtien puristamista paikoilleen. Elementti saattaa olla geometrisesti viallinen, jolloin sen puristaminen neliön muotoiseen aukkoon nähden epäonnistuu. Tämä voi lisäksi kertautua muillekin elementeille maskilla, sillä puristava jousi vaikuttaa rivikohtaisesti maskissa kaikkiin elementteihin. Elementin sijoittumiseen liittyvä defekti on esitetty kuvassa 25a).



Kuva 25: Kuvia höyrystysprosessissa muodostuvista defekteistä. a) Siirtyneet pädit höyrystysmaskin huonon kohdistuksen vuoksi. Kuvasta huomaa, miten tummalle lasialueelle siirtyneellä pädillä on huomattavan sironnan vuoksi merkittävästi vähemmän kirkkautta verrattuna piipinnalle höyrystettyyn pädiin. b) Kuoriutuva metallointi kontaminaation vuoksi. Konenäölle tämäntapaiset viat ovat kohtalaisen helppoja tarkistettavia kontrastin ollessa suuri eri osien välillä.

### 3.2.3 Defektien vaikutus kokoonpanoon

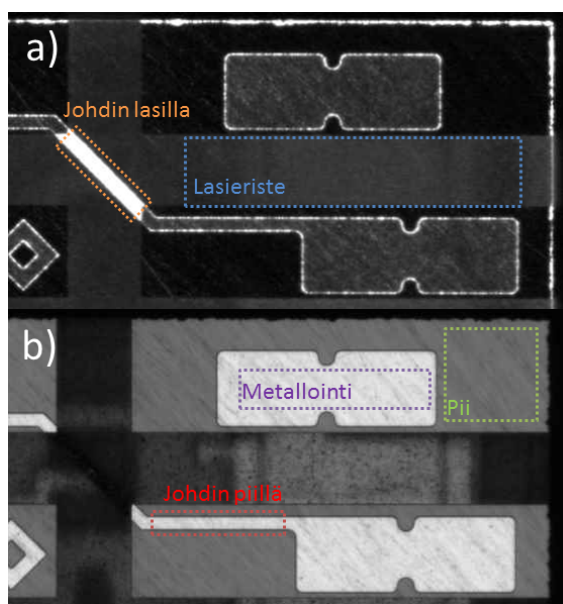
Visuaalisen tarkastuksen yksi tärkeimmistä tehtävistä liittyy lankabondausalueiden varmistamiseen, joka tapahtuu hylkäämällä huonot tuotteet jo elementtivalmistuksen puolella. Tällä tavalla saadaan merkittävä kustannussäästö, sillä kokoonpannun lopputuotteen hylkäys tarkoittaa ylimääräistä kotelon ja ASIC:n hylkäämistä. Lisäksi kehittyneimmillä komponenteilla on toinenkin anturielementti sitä ohjaavan ASIC:n kanssa, jolloin kokoonpanossa tehtävä hylky on jopa kymmenkertainen kustannuksiltaan.

Lankabondauksessa liitetään ASIC, koteloinnin jalat ja elementti sähköisesti yhteen johtavalla langalla. Yleisesti käytettäviä materiaaleja ovat kulta, alumiini, kupari ja hopea. Elektroniikkateollisuudessa yleisesti ottaen pyritään siirtymään kuparilankaan pääasiassa alhaisemman hinnan vuoksi. Korkean luotettavuuden sovelluksissa käytetään kuitenkin yhä kultalankaa, sillä kullalla on huomattavasti parempi korroosion kesto sekä luotettavampi bondautuminen alumiiniin, jota pääasiassa käytetään elementtien kontaktipinnoilla. [28]

Defektit lankabondauspädeillä vaikuttavat suoraan prosessoidun tuotteen luotettavuuteen. Defekteiksi lasketaan partikkelit, kontaminaatiot, kuten orgaaniset jäämät, sekä puuttuva metallointi. Hyvällä onnella lankabondaus keskeytyy bondattavan langan katkeamiseen, jolloin tuote hylätään ja operaattorin tulee käyttää muutama minuutti laitteen saattamiseksi takaisin tuotantoon. Suurempi riski piileekin siinä, että lanka saadaan bondattua vialliselle pädille. Tällöin osalle kontaktialueelle ei ole kunnollista tai lainkaan muodostunut välimetallointia, jolloin kontaktin luotettavuus on merkittävästi heikentynyt. Jos osittain bondautunut liitos pääsee testauksenkin lävitse, piilee tuotteessa riski vikaantua käytössä. [5] [28]

### 3.3 Anturien visuaalinen tarkastus MFI:llä

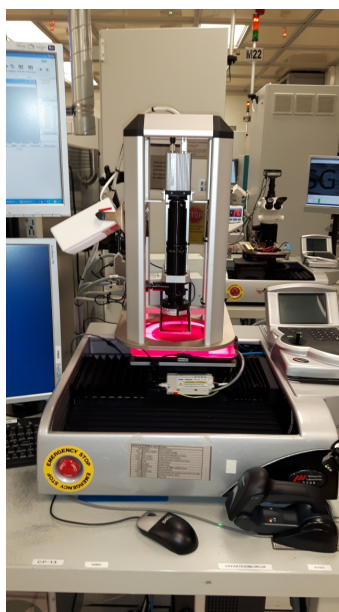
MFI:llä valmistettavat elementit ovat visuaalista tarkastusta tehdessä joko osittain sahattuina piikiekolla taikka teipillisessä kehikossa eli freimissä, joko sahattuina pystyasennossa tai käännettyinä kyljelleen. Päältäkontaktoitavien elementtien pinnat ovat hyvin tasaisia ja peilaavia, sillä niiden piipinta on hienohiottua ja metallialueet ovat sputteroituja piin päälle. Elementeissä on lisäksi lasialueita, joiden pinta on merkittävästi epätasaisempaa sekä läpinäkyvää. Tämän kaltainen elementti on esitetty kuvassa 26. Visuaalisen tarkastuksen spesifikaation mukaan edellä mainitusta tuotteesta tarkastetaan muun muassa johtimien leveys ja niillä olevat defektit, metalloinnilla olevien lankabondausalueiden puhtaus ja naarmut, reunamurtumien syvyys sekä lasialueella olevat poikkeamat. Sivustakontaktoivien elementtien tarkastettava pinta on sahattua, joten sen tasaisuus vaihtelee merkittävästi. Sahaus tekee pinnasta voimakkaasti sirottavaa, mikä vaikuttaa käytettävään valaistusprofiiliin ja valotasoon. Kuvassa 23 on esitetty sivustakontaktoituva tuote. Näistä tuotteista halutaan tutkia muun muassa metallointialueen kohdistusta ja kokoa, lankabondausalueiden puhtautta, reunamurtumia sekä pinnankarheutta. Seuraavaksi perehdytään näitä elementtejä kuvantaviin optisiin tarkastuslaitteisiin ja siihen, mitä etuja ja haasteita laitteilla on näiden tuotteiden tarkastamisessa.



Kuva 26: Erään päältäkontaktoitavan tuotteen rakenteita. Kuvassa a) on pimeäkenkällä otettu kuva, jossa näkyy hyvin kirkkaana eri alueiden rajapinnat, johtimet lasilla sekä elementin reuna. Osassa b) on koaksiaalivalaistuksella otettu kuva samasta alueesta, jonka avulla nähdään hyvin piin päällä olevan metalloinnin poikkeamat.

### 3.3.1 AVI

AVI:t ovat MFI:n vanhempia automatisoituja optisia tarkastuslaitteita. Laite on esitetty kuvassa 27. Kiekkofreimien lataus tarkastusalustalle toteutetaan manuaalisesti operaattoreiden toimesta. Alusta ottaa kiekkofreimin vakuumiin, jolloin se suoristaa teippiä ja mahdollistaa kaikkialta hyvän fokuksen. Tarkastuksen jälkeen laite kytkee automaattisesti kiekon alta tapahtuvan ionisointipuhalluksen, jonka tarkoitus on vähentää sähköstaattisen purkautumisen riskiä, eli ESD-riskiä (Electrostatic Discharge). Lisäksi toinen ionisaattori on alustan vieressä, jolla operaattorit ionisoivat kiekon etupinnan. Kiekkojen lataaminen ja purkaminen on siis manuaalista työtä, tuoden viivettä kiekkojen ajojen väliin sekä mahdollistaa inhimillisen virheen luoman ESD-riskin.



Kuva 27: AVI-tarkastuslaite. Kamera on suojaavan kehikon ympäröimä. Kameran alapuolella on punainen suodatin. Lisäksi kuvassa on kytkettynä päälle tarkastusalustan taustavalo.

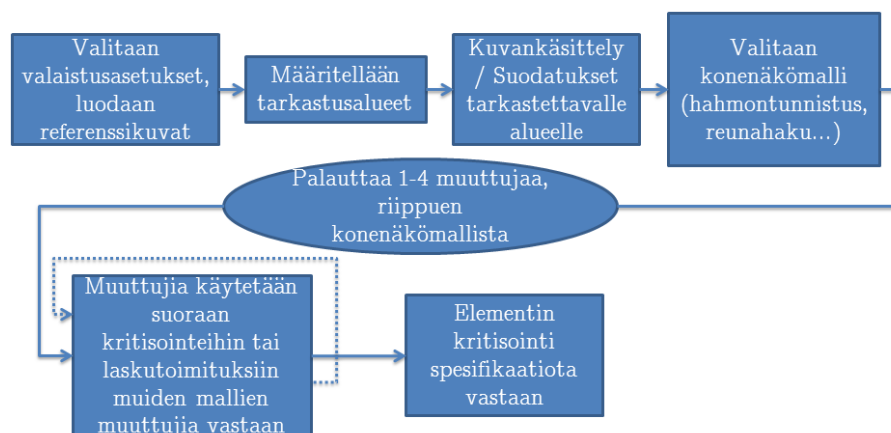
Itse tarkastusta ja kuvaamista varten voidaan käyttää kolmea eri valoasetusta: taustavalaistusta, ledipohjaista suoraa etuvalaistusta tai jyrkässä kulmassa olevaa rengasmaista IR-valaistusta. Valaistuslähteen tuottamaan intensiteettiin ei ole takaisinkytkentää, joten niitä joudutaan erillisestä kontrollointiohjelmasta säätämään tarvittaessa. Tämän vuoksi ledeihin perustuvat pitkäikäiset ja stabiilit valonlähteet ovat välttämättömiä kyseisellä laitteella. Lisäksi kameran eteen on asennettu noin 45° kulmassa punainen suodatin, joka kasvattaa kontrastia piin ja muiden alueiden välillä. Suodatin on alttiina puhtastilan ilmalle, jolloin siihen kertyy ajan kuluessa partikkeleita. Lisäksi suodattimen sijainti kehikollaan vaikuttaa hyvin voimakkaasti kameran kennolle saapuvaan intensiteettiin, joten sillä on luultavasti



jonkinasteista interferenssivaimennusta tietyille aallonpituuksille. Rengasmaisella IR-valaistuksella saadaan pimeäkenttämäinen efekti, sillä elementtien pinnat ovat hyvin peilaavia ja vain epätasaiset, sirottavat pinnat tuovat kameran kennolle vasteen.

Kiekkoja liikutetaan kameran alla probausalustalla, jotka on suunniteltu piikiekolla olevien elementtien sähköiseen testaamiseen. Se on siten melko hidas liikkumaan, mutta tarkastuksen nopeutta rajoittaa kuitenkin lähinnä prosessorin teho ja tarkastusalgoritmien nopeus. Liikkuvan alustan avulla saadaan asetettua tuotekohtaisesti korkeus, jolla elementtien kuvaaminen toteutetaan. Tämä tuottaa ongelman eri valaistusasetuksia käytettäessä, sillä infrapuna- ja LED-asetuksilla on toisistaan poikkeava optimifokus johtuen linssien kromaattisesta aberratioista [10]. Nykyisessä järjestelmässä otetaan peräkkäin molemmat edellämainittujen valaistusasetusten tuottamat kuvat, eikä tässä välissä ole mahdollista muuttaa tarkastettavan kohteen esiasetettua korkeutta. Tämän vuoksi toinen tai molemmat kuvat joudutaan ottamaan hieman epäoptimaalisessa fokuksessa. Systemi myös varmistaa alussa kiekon oikean kohdistuksen erillisellä tarkastusohjelmalla.

Elementit kuvataan 2.5x suurennoksella ja 1004\*1004 pikselin resoluution omaavalla kameralla. Kuvat käsitellään sovelluksella, joka käyttää Matroxin MIL-kirjaston konenäköalgoritmeja kuvan käsittelyyn ja tunnistamiseen. Sovellus lähettää tämän jälkeen elementtikohtaista dataa, joka reaaliajassa siirretään ulkoisella LabView-sovelluksella tietokantaan kritisoiavaksi.



Kuva 28: Tarkastusvuo AVI:lla. Referenssikuvien avulla määritetään tarkastettavat alueet sekä elementtien kohdistusalueet.

Kuvassa 28 on havainnollistettu yksinkertaistettu malli AVI-tarkastuksen kulusta. Alussa valitaan valaistusasetukset sekä määritellään tarkastettavat alueet. Tämän jälkeen prosessoidaan tarkastusalueista haluttu informaatio ulos. Kuvankäsittelyyn on tarjolla erittäin laajasti funktioita, joiden avulla voidaan erottaa kiinnostavia alueita toisistaan tai pyrkiä vähentämään kohinaa. Erilaisia AVI:n suodatuksia on



demonstroitu kuvassa 16. Kun kiinnostavat tekijät on kuvasta saatu korostettua, valitaan konenäkömalli. Malleja on vajaa kymmenen, joissa esimerkiksi reunahaulle annetaan suurin piirtein tieto etsittävän reunan sijainnista. Reunahakua voidaan käyttää käsiteltylle, binärisoidulle kuvalle mutta usein haku toimii parhaimmalla tarkkuudella käsittelemättömälle kuvalle. Tämä johtuu siitä, että algoritmille on suurempi määrä informaatiota käytössä käsittelemättömällä kuvalla. Malli palauttaa reunahausta muutaman oleellisen muuttujan: alku- ja lähtöpisteet, keskipisteen sekä kulman y-akseliin nähden. Tästä voidaan suoraan kritisoida elementti esimerkiksi lasketun kulman avulla tai tehdä toinen vastaava malli toiselle puolelle elementtiä, joiden keskipisteiden erotuksella saadaan elementin leveys tai pituus laskettua. Muita käteviä malleja on esimerkiksi ”blob-malli”, joka palauttaa binääriseksi suodatetusta kohteesta pinta-alan ja keskipisteen sijainnin x- ja y-suunnassa. Mallin sisältä voi myös säätää, halutaanko esimerkiksi ylimmän pikselin sijainnista kyseiset sijaintitiedot. Näin voidaan määrittää esimerkiksi se, mihin asti reunasta alkava murtuma ylettyy. Lisäksi pinta-alaa käytetään erittäin monessa mallissa, sillä tarkastettavien tuotteiden spesifikaatioissa määritellään usein sallittuja maksimipinta-aloja erinäisille defektityypeille.

Yleisesti ottaen AVI:lla lähdetään liikkeelle joustavilla alatason malleilla, joiden tuloksia yhdistelemällä ja vertailemalla voidaan selvittää lähes mistä tahansa konenäköön liittyvästä tehtävästä. Ongelmaksi käytettävyyden suhteen tulee mallien visuaalinen ilme ohjelmistossa, sillä kaikki mallit ovat listamaisesti luontijärjestyksessä allekkain. Järjestystä ei voi edes muuttaa, eikä ohjelma tarjoa mitään visuaalista ominaisuutta joka kertoisi miten mallit linkittyvät toisiinsa. Tämän vuoksi reseptien työstäminen on äärimmäisen työlästä, sillä mallien väliset yhteydet pitää tarkastaa malli avaamalla eikä malleja voida avata useampaa yhdellä kertaa. Haastetta kasvat-  
taa se, jos alkuperäisellä tarkastusohjelmalla dokumentointi on ollut puutteellista tai muuttujien nimet eivät ole johdonmukaisia.

### 3.3.2 CAVI

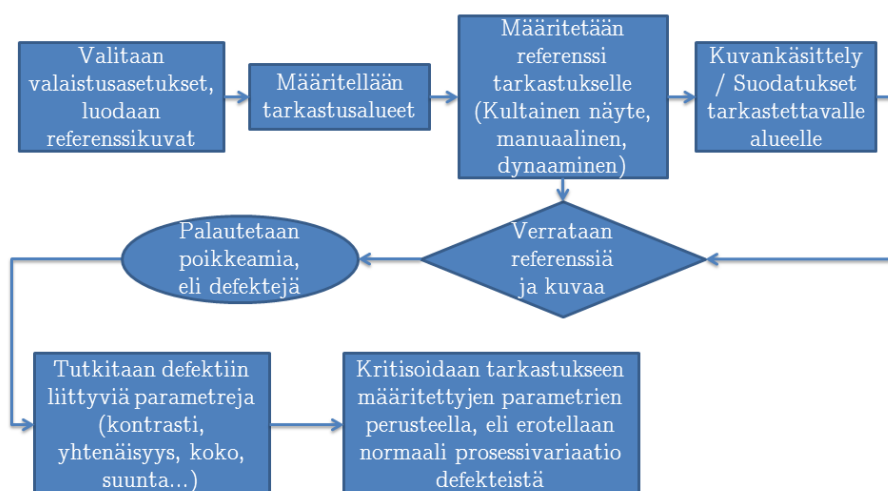
CAVI:lla (Chip Automated Visual Inspection) tarkoitetaan MFI:lle vastikään asennettua optista mittalaitetta. Tarkastusaseman viereen saa modulaarisesti kiekonkäsittelijän, joka lukee kiekkojen viivakoodit ja laserkaiverrukset sekä siirtää kiekkoja tarkastusasemalle ja sieltä takaisin kiekkokasetteihin. Tämän ansiosta laitteelle voidaan syöttää kiekkokaseteissa yhteensä jopa 75 kiekkoa, jolloin kiekkojen ajojen välille ei jää juurikaan laitteelle turhaa lepoaikaa. Lisäksi kiekonkäsittelijä ohjaa tarkastusasemaa, jolloin kiekonkäsittelijälle saadaan täysi integraatio tuotannonohjausjärjestelmään SECS/GEM-kommunikoinnin kautta. Tämän kommunikaation avulla voidaan esimerkiksi automatisoida tarkastusreseptin valinta ja informoida operaattoreita poikkeavista kiekkoista sekä ilmoittaa tuotantosysteemille laitteen ja kiekkojen tilasta reaaliaikaisesti.

Tarkastusasema koostuu modulaarisesti useasta osasta. Optisessa alkupäässä

on Moritexin valaistusmoduuli. Valaistusmoduuliin asennetaan metallihalidilamppu jonka käyttöikä on 1500 tuntia. Valo ohjataan Moritexin ulostuloon, jossa on lisäksi kolmesta osasta koostuva mekaaninen vaimenninsysteemi. Vaimenninta tarvitaan pitämään valaistusteho näytteellä tasaisena, sillä lampun tuottama teho laskee jopa 40 % käyttöikänsä aikana. Valaistuksen intensiteetin säätämisessä suurin merkitys on reikävaimentimella. Siinä on kahdeksan eri asetusta, joista jokaisella on eri määrä erikokoisia valoa läpipäästäviä reikiä. Tämän lisäksi systeemissä on rakovaimennin, joka on ympyränmuotoinen levy jossa on kapeneva rako. Näiden lisäksi systeemi hienosäätää intensiteettiä laskemalla lampulle syötettyä jännitettä. Valaistusmoduulin tuottama valoteho ohjataan optiselle kuitukaapelille. Valokuitu menee puoliheijastavaan peiliin, jonka takana on fotodiodiin perustuva takaisinkytkentäpiiri. Piirin vahvistusta säädetään potentiometrillä, ja sen tarkoitus on toimia takaisinkytkentänä valon intensiteetille, ohjaten Moritexin vaimenninsysteemiä pitäen ulostulointensiteetin esiasetetulla tasolla. Suurin osa valosta menee peilin kautta mikroskoopin valonlähteen sisääntuloon, jossa voidaan tarvittaessa kytkeä diffuuseri päälle. Mikroskoopissa on kaksi suurennosvalintaa, 2.5x ja 5x, joiden lisäksi se tukee pimeäkenttäkuvantamista. Lisäksi normaalin koaksiaalivalaistuksen kanssa on mahdollista käyttää punaista suodatinta, jolla saadaan parempi kontrasti metallin ja piin välille. Mikroskoopin ympärillä on myös RGB-ledeihin perustuva rengasvalo, jota käytetään etenkin pimeäkenttäkuvantamisessa. Kuvassa 30 on demonstroitu monipuolisten valoasetusten tuomaa hyötyä. Rengasvalolla ei ole omaa takaisinkytkentää, vaan valojen intensiteetin kehittymistä tulee seurata erillisellä monitoroinnilla.

Mikroskoopin alla on metallinen alusta kiekkoille. Alustassa on useita pieniä reikiä, joiden avulla tarkistettavat kiekot ja kiekkofreimit saadaan vakuumiin, joka pitää elementit paikoillaan sekä suoristaa hieman kuperat piikiekot. Lisäksi rei'istä saadaan puhallettua ionisoitua ilmaa kiekkojen pohjalle, jota tarvitaan ESD-riskin minimoimiseksi poistettaessa kiekkoa asemalta. Myös kiekkoalustan yläpuolella on useita ionisaattoreita, jotka toimivat täysin automaattisesti synkronoituna kiekonkäsittelijärobotin siirtäessä kiekkoja. Itse alusta liikkuu kaikkiin suuntiin sekä kiertyy akselinsa ympäri. Jokaisella tarkastettavalla kiekolla toteutetaan automaattinen fokuksen haku siten, että kiekkoa nostetaan z-akselissa ja sitä kuvataan noston aikana. Muodostuneesta kuvasta nähdään, milloin kontrasti suurimmillaan. Tämä huippuarvo valitaan fokustasoksi. Tämä on erittäin hyvä ominaisuus, sillä kiekkoilla ja niiden alla olevilla teipeillä saattaa olla paksuusvaihtelua. Kuvantamisessa alusta liikkuu halutulla nopeudella jota vastaan synkronoidaan CCD-kennon lukunopeus, eli systeemi käyttää TDI-kuvantamistekniikkaa.

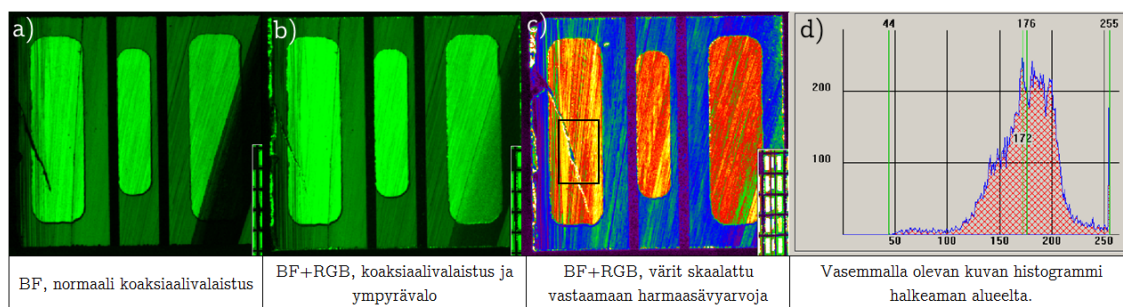
AVI:in verrattuna CAVI:n ohjelmisto ja toimintaperiaate on rakennettu käyttäjäystävällisemmäksi. CAVI:n konenäön toimintaperiaate on esitetty kuvassa 29. Tarkastusreseptien teko ohjataan yksityiskohtaisesti tasolta toiselle, jolloin reseptin perustoiminnot saadaan nopeasti rakennettua. Ohjelmistosta on poistettu lukuisasti konenäköön liittyviä kuvankäsittelymetodeja ja annettu laiteinsinöörille melko rajoitetut kädet esimerkiksi suodatuksiin ja tarkastettavan kuvan ominaisuuksien vertailuun. Sen sijaan laite antaa kohtalaisen helpokäyttöiset sekä toimivat työkalut



Kuva 29: Tarkastusvuo CAVI:lla.

defektien erottamiseen tutkittavilta alueilta. Työkalulla siis pääpiirteittäin valitaan ensiksi tarkastettavat alueet ryhmittäin. Tämän jälkeen eri ryhmille määritellään omat referenssitasot, joilla normaalien harmaasävyarvojen tulee sijaita. Näiden rajojen ulkopuolelle asettuvat piirteet tulkitaan defekteiksi. Referenssitasot voidaan muodostaa suoraan elementin kultaisesta näytteestä. Lisäksi ne voivat muuttua dynaamisesti elementti kerrallaan, tai koostua viimeisen  $n$ -elementin harmaasävyystä. Myös kiinteiden ylä- ja alarajojen asettaminen sallituille harmaasävyarvoille on mahdollista. Lisäksi voidaan tehdä muutamia yksinkertaisia suodatuksia tarkastettaville alueille sekä summata yksittäisiä defektejä yhteen. Piirteet referenssin asettamien rajojen ulkopuolella tulkitaan potentiaalisiksi defekteiksi ja lähetetään jatkoprosessoitavaksi. Prosessointi tapahtuu reilua kymmentä defektin ominaisuutta kritisoiden, joista mainittakoon pinta-ala, kontrasti taustaa vasten, defektin sisäinen kontrasti ja keskimääräinen harmaasävyarvo. Näitä parametreja voidaan yhdistellä AND- tai OR-operaatioilla, jolloin pystytään kohtalaisen hyvin erottamaan oikeat viat turhista hylyistä. Erityisen hyvin lukuisia muuttujia voidaan analysoida laitteen tulostenkäsittelysovelluksella, joka kiekon ajon jälkeen interaktiivisesti listaa kaikki löydetty defektit niiden parametrit mukaan lukien. Eri parametreja yksitellen listaamalla saadaan nopeasti eroteltua oleelliset parametrit, joiden avulla saadaan suodatettua väärät hylyt pois.

CAVI on siis käytettävyydeltään erittäin toimiva kokonaisuus ja defektien kritisointi on hyvin visualisoitu tarkastusalueisiin nähden. Ohjelmiston osat on intuitiivisesti sijoitettu. Vaikka kuvankäsittelyssä on monta eri vaihtoehtoa defektien erottamiseen taustasta, saisi erilaisia ohjelmallisia suodattimia olla reilusti enemmän. Lisäksi suodattimien testaaminen on tehty vaivalloiseksi, sillä useaa suodatusoperaatiota käytettäessä välivaiheita ei voida tarkastella. Laitteen löytämillä defekteilla voisi myös olla lukuisia muitakin parametreja, esimerkiksi löydetyn defektin pikselien jakaumasta kertovia tunnuslukuja.



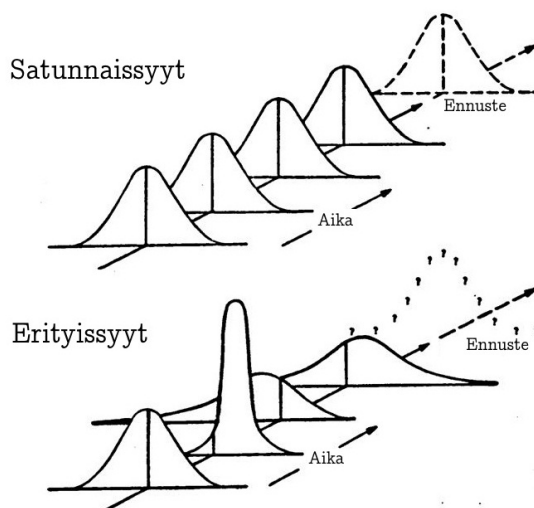
Kuva 30: Esimerkki CAVI:n monipuolisten valaistusasetusten luomista mahdollisuuksista. Kohdassa a) on käytössä vain normaali koaksiaalivalaistus, jolloin vasemmalla oleva hiusmurtuma ja oikealla oleva tummentuma johtaisivat molemmat elementin hylkäämiseen, vaikka tummentuma ei vaikuta tuotteen jatkoprosessoitavuuteen. Seuraavassa b) kuvassa on valoasetuksiin lisätty rengasvaloa, joka häivyttää tarkoituksenmukaisesti tummentumaa mutta myös haitallista hiusmurtumaa. Kohdassa c) laskettiin hieman koaksiaalivalaistuksen määrää ja muutettiin harmaasävyskaalaa visuaalisemmaksi. Kohdassa d) on piirretty histogrammi kuvassa c) murtuman alueelle piirretyn mustan laatikon sisältämille pikseleille. Histogrammista nähdään oikeassa laidassa saturoitunut intensiteettiipiikki, joka johtuu murtuman tuottamasta heijastuksesta. Tätä piikkiä voidaan käyttää defektin käsittelyssä hylkäämään viallinen tuote. Tämänkaltaisella valaistusten sekoittamisella voidaan häivyttää turhia hylkyjä pois ja keskittyä vain ja ainoastaan aitojen defektien löytämiseen, mikä laskee merkittävästi turhien hylkyjen määrää.

## 4 Prosessin kontrollointi

Prosessin kontrollointi ja monitorointi on erittäin tärkeässä roolissa jatkuvan kehittämisen kannalta. Jatkuvaa kehittämistä vaativat sekä asiakkaat että tuotantolaitosten johto. Molemmilla osapuolilla on yhteinen tavoite: halvempi hinta tuotteille sekä korkeampi ja tasaisempi laatu [29]. Lisäksi prosessin kontrollointiin liittyvät tekijät pätevät myös mittalaitteen analyysiin. Näiden seikkojen vuoksi seuraavassa kappaleessa käydään läpi yleisimpiä periaatteita liittyen prosessikontrolliin.

Kaikilla prosesseilla on niille itselleen ominaisia parametreja, jotka vaikuttavat prosessin ulostuloon. Prosessiparametrien tilastollinen analyysi luo matemaattisen pohjan prosessiin vaikuttavien muuttujien tutkimiselle sekä niiden vaikutuksen syvälliselle ymmärtämiselle. Oleellisimmille prosessiparametreille määrätään kontrollirajat, eli ylä- (UCL, Upper Control Limit) ja alaraja (LCL, Lower Control Limit), prosessista kerättyjen mittaustulosten perusteella. Kontrollirajat perustuvat oletukseen, että muuttujat ovat normaalijakautuneita, ja itse rajat asetetaan keskiarvosta  $\pm 3\sigma$  etäisyydelle, jossa  $\sigma$  kuvaa prosessivaihtelun keskihajontaa. Myös ei-normaali data voidaan muuntaa normaaliksi ja käsitellä sitä kautta. Näitä parametreja mitataan tuotannossa päivittäin, ja kun poikkeavia tuloksia ilmenee, niiden juurisyy tulee analysoida. Syyt voivat olla joko *erityis-* tai *satunnaissyyt*. Satunnaissyyt kuvaa jatkuvasti prosessissa olevaa vaihtelua. Esimerkiksi  $3\sigma$  rajat ylittyvät tilastollisesti 0,3 % todennäköisyydellä jokaista mittausta kohden. Erityisyyllä tarkoitetaan yhtä poikkeamaa, joka on huomattavan kaukana kontrollirajoista tai tapahtumasarjaa, joka siirtää mittauksien keskiarvoa pois normaalilta alueeltaan. Erityisyyttä ovat siis tapahtumat, jotka saavat prosessin pois normaalijakautuneesta tilasta hetkellisesti tai pysyvästi. Nämä molemmat syyt on esitetty normaalijakauman vaihteluina ajan yli kuvassa 31. Prosessikehityksen kannalta oleellista on löytää erityisyyt sekä niiden lähde, jonka perusteella voidaan selvittää korjaavia toimenpiteitä. Yleensä prosessit, erityisesti kontrolloissa olevat, ovat normaalijakautuneita. Normaalijakauman ominaisuuksiin kuuluu sen huipukkuus, vinous, keskiarvo sekä hajonta. Prosessin optimoimisen kannalta halutaan lähes aina pienentää hajontaa, sillä pieni hajonta tarkoittaa parempaa kontrollia. On hyvä myös muistaa, että erityisyydestä johtuva poikkeama voi myös olla positiivinen asia tuotteen kannalta, jolloin prosessikontrollin tulisi myös selvittää sen syy ja pyrkiä implementoimaan kyseinen ilmiö pysyvästi prosessiin. [29] [30]

Perinteisesti teollisuudessa tuotelaadun kontrollointi on hyvin suoraviivaista: valmistetaan tuote, jota verrataan spesifikaatioihin. Jos tuote poikkeaa spesifikaatiosta, se hylätään. Tämänkaltaista strategiaa kutsutaan *havaitsemiseen perustuvaksi*. Tämä menetelmä käy monimutkaisissa ja pitkäkestoisissa valmistusprosesseissa erittäin kalliiksi ja tehottomaksi, jonka vuoksi rinnalle voidaan ottaa käyttöön ongelmien *ehkäisemiseen perustuva* kontrollointi. Tässä menetelmässä monitoroidaan oleellisia prosessiparametreja sekä mitataan prosessin ulostuloa useassa eri vaiheessa. Mittaus voi olla rikkovaa satunnaistestausta tai ei-rikkovaa, kuten dimensioiden mittaamista. Tällä tavalla saadaan jatkuvaa dataa prosessista, ja nähdään jos systeemi on siirtymässä pois *prosessi-ikkunasta*. Prosessi-ikkunalla tarkoitetaan tiettyjen prosessi-



Kuva 31: Prosessissa ilmenevät satunnais- ja erityissyyt. Satunnaissyyt tuottavat lähes identtisiä todennäköisyysjakaumia ajan yli. Erityissyyden aiheuttamat normaalijakaumat ovat taas hyvin voimakkaasti riippuvaisia valitusta ajanhetkestä. Lainattu ja muokattu lähteestä [30].

parametrien reunaehtoja, joiden sisällä pysyttäessä tuotteen laatu pysyy kontrollissa. Tällöin saadaan tuotanto pysäytettyä jo ennen kuin tuotteen kannalta kriittisiä ongelmia on ilmennyt ja ongelmien juurisyyn päästään ajoissa kiinni. [29] [30]

## 4.1 Prosessin kyvykkyys

Tasaisen ja stabiilin laadun tuottamiseksi on oleellista pitää prosessi kontrollissa. Tämän saavuttamiseksi tulee tuntea prosessin kyvykkyys. Kyvykkyys koostuu mittauslaitteissa seuraavista ominaisuuksista:

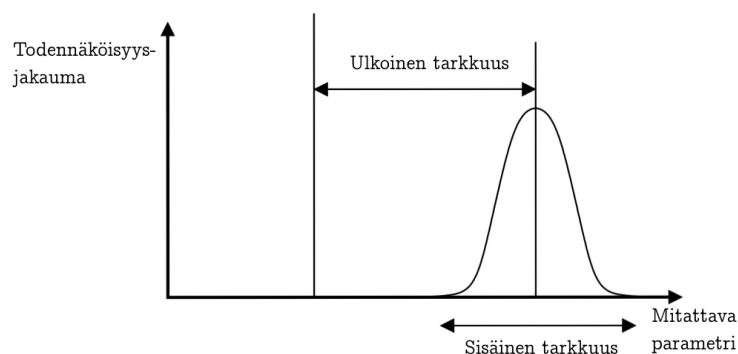
*Ulkoinen tarkkuus*, tai *harha* (engl. *bias*), kertoo mittauksien keskiarvon poikkeaman todelliseen arvoonsa nähden. Ulkoista tarkkuutta voidaan parantaa esimerkiksi kalibroinnin perusteella tehtävän säätämisen avulla, mutta todellinen arvo on todellisuudessa aina subjektiivinen, jolloin täydellistä ulkoista tarkkuutta on mahdotonta saavuttaa. [29]

*Sisäinen tarkkuus* kuvaa yksittäisten mittausten keskinäistä toistettavuutta. Tätä ominaisuutta kuvataan yleensä termeillä keskihajonta ja varianssi. Sisäisen tarkkuuden vaihtelu johtuu tilastollisesta vaihtelusta, jota ei voida täysin poistaa mutta voidaan pienentää merkityksettömäksi. Tarkkuudet on demonstroitu kuvassa 32. [29]

Mittausoperaation *toistettavuus* on myös sisäistä tarkkuutta kuvaava termi, ja se liittyy määritelmän mukaan lyhyen ajan sisällä tehtäviin mittauksen toistoihin

saman mittajaan toteuttamina. Se kuvaa siis sitä sisäistä tarkkuutta, jonka mittalaite pystyy ideaalilanteissa aina saavuttamaan. [6]

*Uusittavuudella* tarkoitetaan eri mittajien tai keskenään poikkeavissa ympäristöolosuhteissa suoritettujen mittauksien keskiarvojen vaihtelua. Toisin sanoen, sillä tarkoitetaan ulkoisen tarkkuuden siirtymistä operaattoreiden välillä. [6]

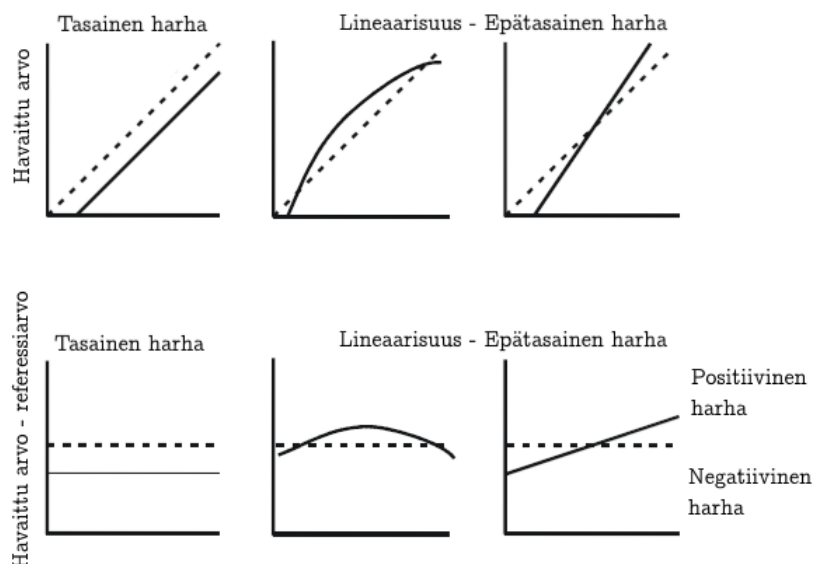


Kuva 32: Sisäinen ja ulkoinen tarkkuus. Vasen pystyviiva kuvaa tavoitearvoa ja oikea pystyviiva saatujen tulosten keskiarvoa.

*Stabiilisuus* kuvaa ulkoisen tarkkuuden muuttumista ajan suhteen. Esimerkiksi työntömitta saattaa käytössä kulua, jolloin sen harha todelliseen arvoon kasvaa mitauksia toistettaessa. [6]

*Lineaarisuus* kuvaa mittaustulosten harhan käyttäytymistä mitta-alueen yli. Kuvassa 33 nähdään tyypillisiä epälineaarisuuksia harhassa. [6]

*Gage R&R* on termi testille, joka kuvaa mittasysteemin toistettavuutta ja uusittavuutta, huomioiden esimerkiksi operaattoriperäisen vaihtelun mittauksissa. Optisissa kiekkotarkistuksissa Gage R&R toteutetaan referenssikiekoilla, joissa on etukäteen tunnetuilla paikoilla viallisia elementtejä. Näitä kutsutaan Gage-kiekoiksi. Tällä tavalla saadaan monitoroitua laitteen todellista suorituskkyä ja toistettavuutta, mutta mahdollisten ongelmien juurisyytä ei tällä tavalla voida suoraan tarkkailla. Kiekkojen tarkastuksissa elementit määritellään kvalitatiivisesti hyviksi ja huonoiksi, jonka vuoksi toistettavuuden tunnuslukuina toimii väärin hylkäämisen osuus eli FA (False Alarm rate) sekä läpäisevien vikojen osuus, MR (Miss Rate). Molemmat ovat suhteellisia osuuksia hyvien ja huonojen osien kokonaismäärästä. Tämän vuoksi niin sanotuilla Gage-kiekoilla suositellaan olevan noin puolet hyviä ja huonoja elementtejä, jotta molemmille tunnusluville on sama määrä näytteitä. Kolmas testiin liittyvä tunnusluku liittyy käyttäjien väliseen toistettavuuteen, mutta tämä ei ole kovinkaan merkittävä tekijä konenäön kannalta, sillä operaattorit eivät voi vaikuttaa mittaustulokseen ja lyhyen aikavälin toistettavuus on stabiililla mittalaitteella äärimmäisen hyvä.



Kuva 33: Lineaarisuus. Ylemmät kuvaajat näyttävät mittausarvon (tasainen viiva) poikkeaman oikeasta arvosta (katkoviiva). Alemmassa kuvassa nämä on normalisoitu vähentämällä todellinen arvo mitatusta arvosta kaikissa mittauspisteissä. Mittausysteemeissä on lähes aina harhaa ja on tavanomaista että harha ei ole lineaarista mittausalueen ylitse. Kuva on muokattu ja lainattu lähteestä [6].

## 4.2 Mittaussysteemin analyysi

Mittauksia tehdään yleensä sen vuoksi, että saadaan palautetta jonkun tuotantoprosessin kyvykkyydestä. Sen perusteella tiedetään pysyikö tuotantoprosessi kontrollissa ja voidaan tarvittaessa säätää sitä sekä hylätä huonoja tuotteita. Sillä siis toisin sanoen säädetään prosessin ulostuloa, jolloin voidaan puhua takaisinkytketystä prosessista. Lisäksi itse mittaus on prosessivaihe, mittausprosessi. Siinä sisääntulona toimii kontrolloitava tuotantoprosessi josta mitataan haluttuja ominaisuuksia. Ominaisuuksista saadaan jokin arvo, jota analysoimalla tehdään päätös, joka voi olla esimerkiksi tuotantoprosessin säätötoimenpide. Tämä päätös on mittausprosessin ulostulo. [6]

Jotta mittausprosessiin ulostuloon perustuvat päätökset ovat oikeita, tulee saadun datan olla mahdollisimman oikeaa sekä toistettavaa. Mittaussysteemin tuntemisen edellytyksenä on toteuttaa laaja selvitys mittaukseen vaikuttavista tekijöistä, jota kutsutaan MSA:ksi (Measurement System Analysis). Selvityksen on tarkoitus tuottaa tietoa mittalaitteen kyvykkyydestä ja määrittää stabiilin toiminnan raja-arvot. Analyysissä kannattaa aloittaa oleellisten prosessiparametrien määrittelystä, jotta monitoroidaan mittaukseen eniten vaikuttavia tekijöitä. Tuotantoprosessiin jalkautettua monitorointia kutsutaan SPC:ksi (Statistical Process Control), jonka raja-arvot perustuvat MSA:sta saatuu dataan. SPC-referenssi voi olla esimerkiksi yksinkertainen standardoitu pituusmitta, jota mittaamalla voidaan tutkia pysyikö mittalaite stabiilina. [6]



Ideaalinen mittalaite tuottaa vain ja ainoastaan oikeita tuloksia jokaisella käyttökerralla. Tämänkaltaisen systeemi olisi tilastollisesti täydellisessä kontrollissa, jolloin varianssi, harha ja todennäköisyys vääriin tuotteen hyvyysluokitteluun ovat nolla [6]. Todelliset mittaussysteemit ovat kaukana tästä. Tämä johtuu siitä, että usein ollaan valmiita uhraamaan tilastollista stabiilisuutta nopeuden, hinnan tai jonkin muun käytettävyyteen vaikuttavan ominaisuuden vuoksi. Usein tämä onkin oikea lähestymistapa, jos tilastollinen vaihtelu pysyy järkevissä rajoissa. Lisäksi tilastollisen vaihtelun eri tekijöiden merkitys vaihtelee sovelluskohteesta riippuen. Esimerkiksi harhan lineaarisuudella ei ole merkitystä, jos mitattavat kohteet koostuvat vain pienestä osasta mittausaluetta. Toisaalta useissa sovelluksissa absoluuttisella harhalla ei ole merkitystä, jos etsitään keskiarvosta poikkeavia tuotteita. Tämä tarkoittaa sitä, että analyysissä tulee selvittää kyseisen mittauksen kriittiset ominaisuudet. Seuraavat ominaisuudet määrittävät yleisesti ottaen hyvän mittalaitteen [6]:

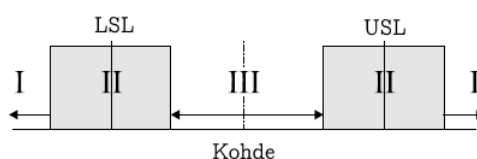
1. Riittävä erottelukyky ja herkkyys. Yleisesti käytetään niin kutsuttua kymmenen pisteen sääntöä, joka määrittää että prosessivariaatio tulee olla jaettavissa vähintään kymmenen mittapisteseen. Samaa periaatetta voidaan soveltaa resoluution valitsemisessa.
2. Mittasysteemin tulee olla tilastollisessa kontrollissa. Tämä tarkoittaa sitä, että toistettavissa olosuhteissa vaihtelu johtuu yksinomaan yleisistä syistä eikä erityisyyistä.
3. Prosessikontrollin näkökulmasta systeemin sisäisen vaihtelun tulee olla pientä verrattuna tuotteen asettamiin spesifikaatioihin. Lisäksi laitteen tuottamien mittaustulosten vaihtelu tulee olla pientä verrattuna valmistusprosessin muodostamaan vaihteluun nähden.

Mittaussysteemin analyysin on tarkoitus selvittää vaihtelun satunnais- ja erityisyyt. Prosessin kontrolloinnin kannalta erityisyyt vaihteluun tulee vähintään tietää ja mahdollisuuksien mukaan poistaa. Kaikki potentiaaliset mittaukseen vaikuttavat tekijät kirjataan ylös esimerkiksi kalanruotokaavioon, jossa ylimmällä tasolla on viisi muuttujaa: mittauskohde, mittausräjähdys, standardi eli referenssi, ympäristö ja operaattori. Näiden alla sijaitseviin alakategorioihin lisätään mittaukseen vaikuttavat tekijät, joista pyritään valitsemaan oleellimmat parametrit tarkempaa tutkimista varten. Tarkempi tutkimus koostuu näiden selvitettyjen parametrien osallisuudesta loppumittauksen vaihteluun, esimerkiksi ANOVA:n (Analysis Of Variance, varianssianalyysi) avulla. [6] [30]

Mittaustuloksista saatavan informaation perusteella tehdään yleensä päätös tuotteen osalta. Vaikka systeemin harha olisi olematon, mittasysteemin luonnollisen sisäisen tarkkuuden vuoksi prosessituotteiden oikea luokittelu hyviin ja huonoihin osiin ei aina onnistu. Jos hyvä tuote luokitellaan vialliseksi, sitä kutsutaan tyyppin 1 riskiksi eli vääräksi hälytykseksi. Tämä on tuotteen valmistajan sisäinen riski. Tyyppin

2 riski tarkoittaa viallisen tuotteen luokittelua hyväksi, jolloin riski tuotteesta siirtyy asiakkaalle. Nämä virheet on havainnollistettu kuvassa 34 ja yhdistetty ryhmään *II*. Väärien luokitteluiden minimoimiseksi tulee siis pienentää mittauksen hajontaa, jolloin ryhmän *II* osuus ryhmiin *I* ja *III* nähden pienenee. Toinen vaihtoehto on pienentää prosessin hajontaa, jolloin saadaan sama lopputulos. [6]

Eri riskien esiintymisfrekvenssien estimaatit on tarkoitus selvittää mittalaitteanalyysissä. Tämä vaatii kaikkien tuotteiden osalta oman analyysinsä, joten laaja-alainen MSA vaatii paljon työtä. [6]



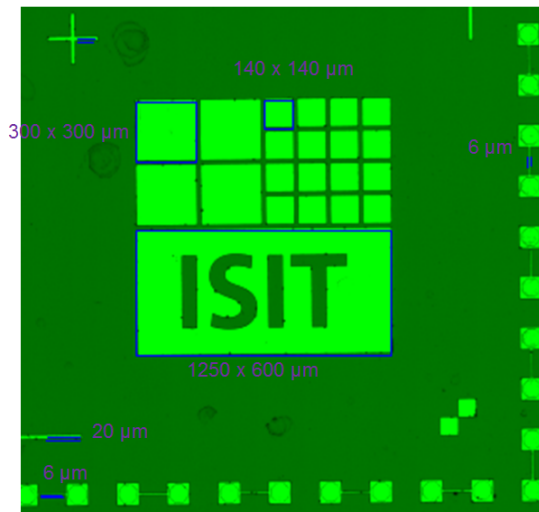
Kuva 34: Vikojen luokittelu. Ryhmä *I* kuvaa huonoja osia jotka luokitellaan aina huonoiksi. Ryhmä *II* kuvaa tuotteen mahdollista väärää luokittelua, eli rajatapauksia. Ryhmään *III* sisältyvät tuotteet, jotka luokitellaan aina oikein. Rajat LSL ja USL (Lower / Upper Specification Limit) kuvaavat tuotteen spesifikaation määäämiä raja-arvoja hyväksyttävälle tuotteelle. Kuva on muokattu ja lainattu lähteestä [6].

## 5 Tulokset

Työn tuloksissa esitellään mittalaiteanalyysin tärkeimmät löydökset sekä se, miten niiden perusteella päätettiin toteuttaa mittalaitteen tuotantomonitorointia SPC:n avulla. Tällä menetelmällä tehtiin mielenkiintoisia havaintoja, joiden erityisyyt analysoidaan ja selvitetään. Lisäksi perehdytään yleisellä tasolla hieman tarkemmin siihen, miten AVI- ja CAVI-laitteiden käytettävyys eroaa toisistaan sekä verrataan näiden kyvykkyyttä toisiinsa MFI:n tuotteiden tarkastamisen osalta.

### 5.1 CAVI stabiilisuus- ja mittalaiteanalyysi

Työn aikana tehtiin mittalaiteanalyysi CAVI:lle. Mittalaiteanalyysin toteuttamiseen käytettiin puhdasta piikiekkoa, jolle oli liimattuna kolme identtistä referenssielementtiä. Referenssielementeissä on samankaltaisia pii-metallirakenteita kuin MFI:n tuotteissa. Rakenteiden välisiä etäisyyksiä mitattiin useasta eri paikasta jokaiselta elementiltä, jotta saatiin tietoa dimensiomittauksen biaksen lineaarisuudesta x- ja y-suuntiin nähden. Lisäksi referenssielementeiltä mitattiin harmaasävyarvoja, jotka korreloivat suoraan valaistuksen intensiteetin kanssa. Referenssielementti on nähtävissä kuvassa 35. Referenssielementillä on lisäksi ristimäinen rakenne, josta mitattiin valkoisten pikselien hajontaa. Tämän parametrin avulla saatiin arvioitua fokuksen syvyyden toistettavuutta. Kappaleessa käydään lävitse mittalaiteanalyysistä vain oleellimmat havainnot, sillä koko mittalaiteanalyysin avaaminen tässä työssä ei toisi juurikaan lisäarvoa.



Kuva 35: SPC-elementin dimensiot. Pikselöitymisen johdosta osa mittausviivoista piirtyy hieman sivuun todellisista mittausalueista. Lisäksi kyseisestä elementistä mitataan harmaasävyarvoja eri valaistusasetuksilla muutamasta eri kohdasta.

Mittausohjelma toistettiin kolmella eri valaistus- ja suodatinasetuksella. Käytetyt valaistusasetukset oli valittu siten, että ne vastasivat mahdollisimman hyvin tuotanto-

resepteissä käytettyjä asetuksia. Käytetyt asetukset on listattu taulukossa 2. Lisäksi kaikilla resepteillä on asetettu intensiteetille 50 %:n taso maksimista. Tätä MSA:ssa käytettyä referenssikiekkoa käytetään myös päivittäin tuotannossa SPC-referenssinä.

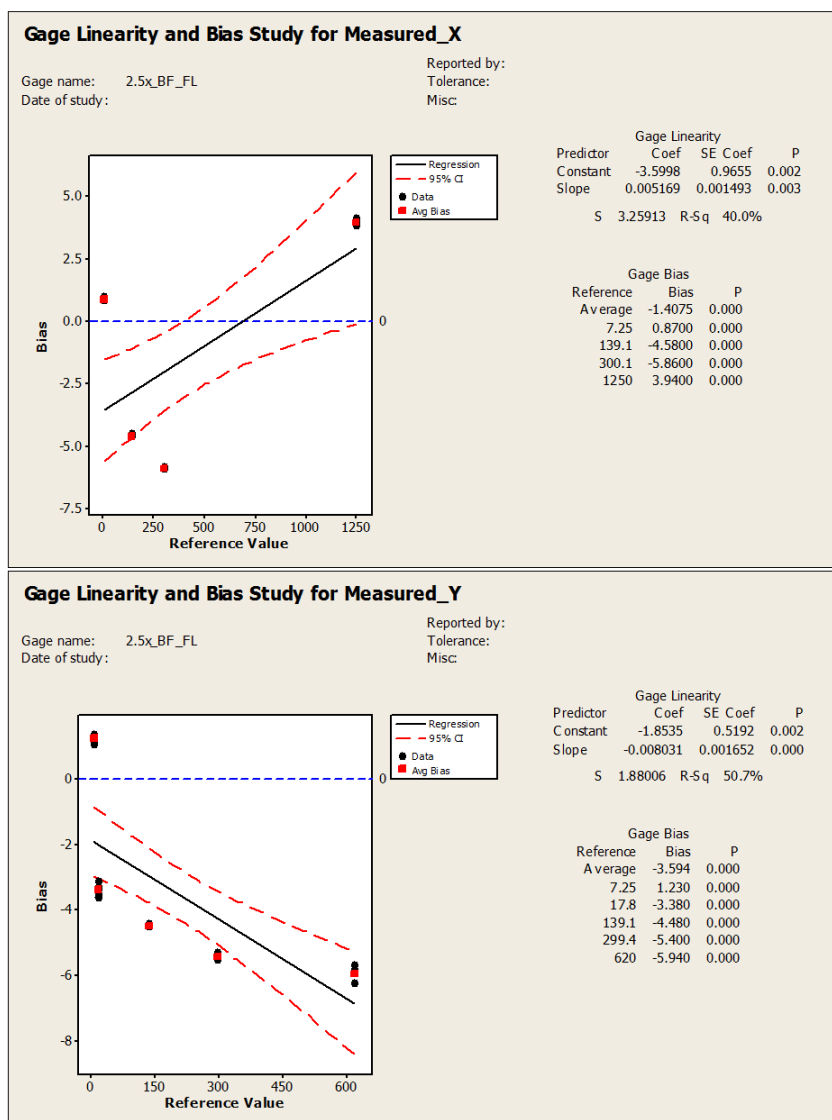
Taulukko 2: Mittalaiteanalyysissä käytetyt valaistusasetukset. Taulukossa on käytetty seuraavia lyhennyksiä: Punainen suodatin (RF, Red Filter), pimeäkenttä (DF, Dark Field), koaksiaalivalaistus (FL, Front Light) ja ympyrävalaistus (RGB)

Suurennos	Suodatin	Valonlähteet	Käyttötarkoitus
2.5x	-	FL	Tasaisen pinnan tarkastus, murtumatarkastus
5x	DF	RGB+FL	Lasialueen defektien tarkastus, partikkelitarkastus, pinnan epäpuhtaisuuksien korostaminen
5x	RF	RGB+FL	Piin ja metallin välisen kontrastin kasvatus

Mittalaiteanalyysissä laitteen mittaussparametreja seurattiin kahden viikon ajan. Tämän avulla saatiin selville kontrollirajat laitteen normaalille toiminnalle SPC-ajoja varten. SPC:n avulla pystyttiin siten seuraamaan stabiilisuutta ja havaitsemaan mahdollisia ongelmia.

### 5.1.1 Bias ja lineaarisuus

Biasta ja lineaarisuutta arvioitiin dimensiomittausten tulosten perusteella. Referensiosissa on kuvaan 35 merkittyjä rakenteita, joiden välisiä etäisyyksiä mittaamalla saadaan tietoa biaksen eli harhan lineaarisuudesta. Kuvassa on merkitty x- ja y-suuntaisia mittoja, sillä mittaustarkkuus saattaa olla hieman poikkeava eri suuntiin nähden. Tämä pätee etenkin skannaaviin mittauksiin, kuten CAVI:lla käytettävään TDI-kuvantamiseen. Tässä menetelmässä skannausalustan nopeuden ja kennon lukutaajuuden on oltava erittäin tarkasti synkronoitua, jotta skannauksen suuntaiset piirteet kuvantuvat oikein. Vastaavaa ilmiötä ei ole skannausta vastaan kohtisuorasti olevilla piirteillä joihin vaikuttaa vain kenno ja optiikka. Harhan lineaarisuuden mittaustulokset on esitetty kuvassa 36. Kuvasta nähdään selkeästi, miten harhan lineaarisuus poikkeaa merkittävästi eri mittaussuunnissa. Ensimmäiseen kuuden mikrometrin mittauspisteeseen kannattaa suhtautua kriittisesti, sillä laitteen resoluutio tälle käytetylle 2.5x-suurennokselle on 2.8  $\mu\text{m}$ . Laitteen mittaustarkkuus on teoriassa alle pikseliresoluution muodostaman rajan hyödyntämällä kontrastia, mutta mitattavan piirteen olisi syytä olla yli kymmenkertainen resoluutioon nähden luotettavien tulosten saamiseksi.



Kuva 36: CAVI:n harhan lineaarisuuden analyysi, 2.5x-suurennoksella ja suoralla etuvalaistuksella, ilman suodatinta. Vaaka-akselilla on mitattava arvo mikrometreinä ja pysty-akselilla harhan suuruuden erotus referenssiosan todelliseen arvoon nähden. Ylemmässä kuvaajassa on x-suunnassa tehdyt mittaukset ja alemmassa kuvaajassa y-suunnassa. Y-suunta on skannaussuunta, ja siinä harha käyttäytyy lineaarisesti. X-suunnassa taas harha on pienillä mitoilla negatiivista ja suurilla mitoilla positiivista. Tämä saattaa kertoa linssin aiheuttamista vääristymistä.

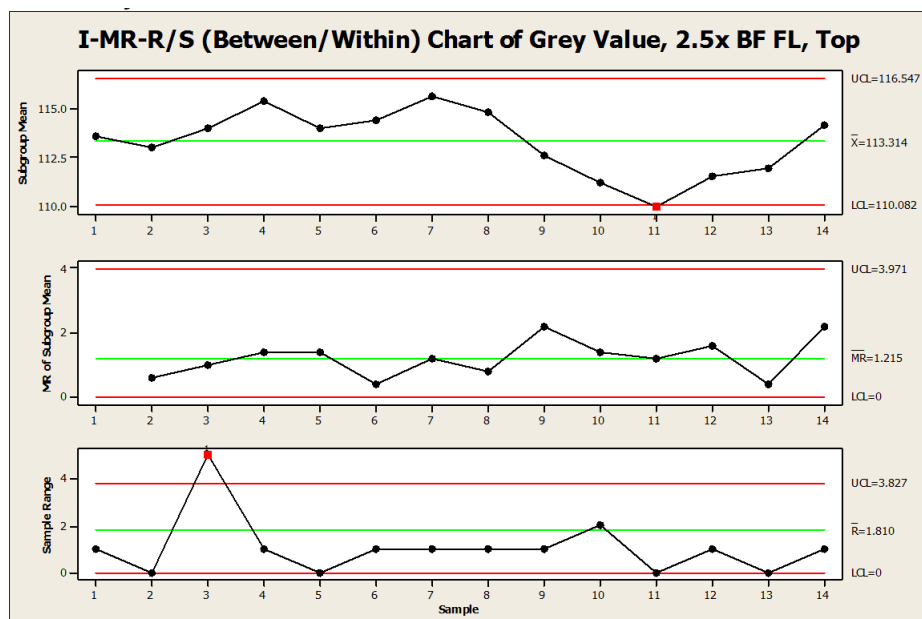
Harhan suuruuden kriittisyyttä tulee verrata kritisointaviin ominaisuuksiin nähden. Laitteen käyttötarkoitusta ja tuotespesifikaatioita ajatellen on kaksi ääripäätä joihin harhan suuruus vaikuttaa: elementtien kritisointi ulkomittojen sekä pienimpien kritisointivien defektien perusteella. Pienimmät kritisointivat defektit ovat  $400\text{ }\mu\text{m}^2$  kokoluokkaa ja elementtien ulkomitat ovat usein muutamissa milloissa. Pienin kritisointiraja defekteillä on lankabondausalueella, ja lankabondauksen kannalta on

yhdentekevää onko defektin ulkomitta  $20 \pm 1 \mu\text{m}$ , sillä se on silti liian suuri bondauksen luotettavuuden kannalta. Lisäksi esimerkiksi laitetta käytettäessä puhtaasti dimensiomittauksiin voidaan huomioida harhan suuruus tuloksia analysoitaessa. Näin ollen biaksen vaikutus on melko marginaalinen, kunhan se pysyy kohtuullisella tasolla.

### 5.1.2 Stabiilisuus

CAVI:n stabiilisuutta arvioitiin kaikkien käytettyjen valaistuskombinaatioiden tuottamien harmaasävyarvojen, fokuksen toistettavuuden ja dimensiomittauksien perusteella. Harmaasävyarvot, jotka ovat valaistuksen intensiteettiin verrannollisia, ovat näistä parametreista kaikista kriittisimpiä. Tämä johtuu siitä, että useimmissa tarkastuksissa on käytettävä eri osien yksilöimisen kriteerinä harmaasävyarvoa. Pienetkin muutokset valotasossa vaikuttavat välittömästi rajatapausten kritisointiin, joka johtaa joko turhiin hylkyihin tai asiakkaalle toimitettavaan riskielementtiin. Dimensiomittauksiin valotason vaihtelu ei juuri vaikuta, sillä niissä käytetään eri pintojen erottamiseen kontrastia. Dimensiomittauksiin voisivat vaikuttaa lähinnä muutokset skannausalustan liikkeessä, mutta nämä ovat kohtalaisen epätodennäköisiä skenaarioita ja näkyvät myös erittäin selkeästi valotason muutoksena. Stabiilisuuden seuranta toteutettiin mittalaiteanalyysin kahden viikon monitorointijaksolla. Analyysin tuloksista on esitetty suodattamattoman valaistuksen tuottamaa harmaasävyarvon vaihtelua kuvassa 37. Harmaasävy pysyi kaikissa mittauksissa  $\pm 3 \text{ GV}$ :n sisällä keskiarvosta, joka on tarkastuksien kannalta riittävällä tasolla.

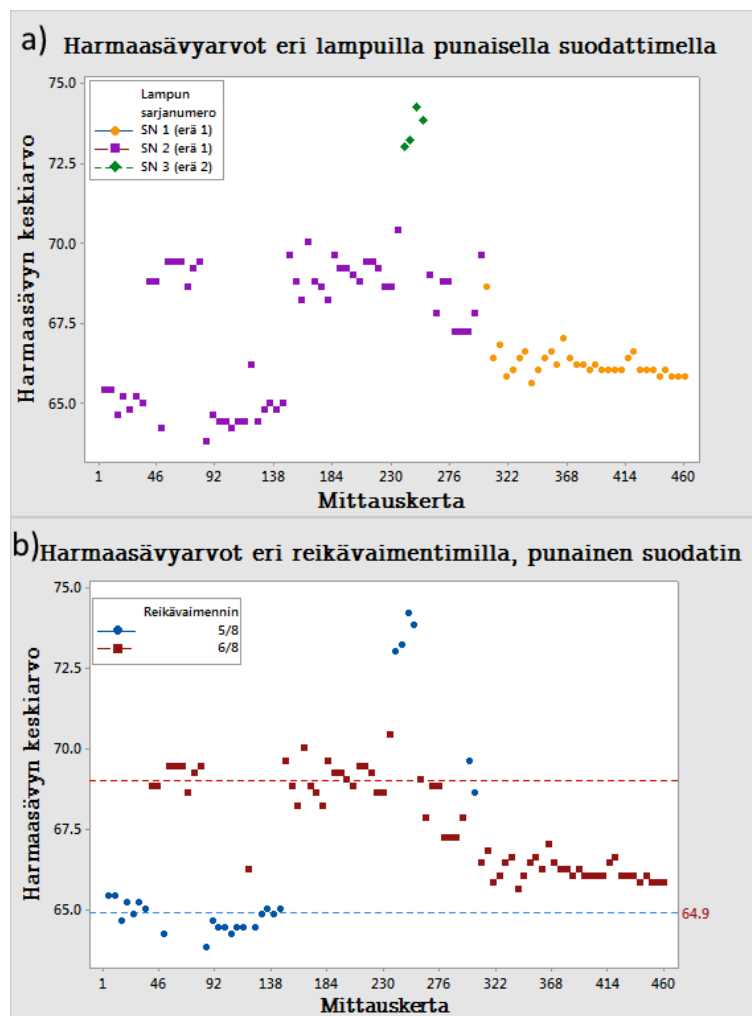
Kaikista seuratuista parametreista saadut tulokset olivat tilastollisia menetelmiä käyttäen riittävällä varmuudella normaalijakautuneita ja stabiileja mittalaiteanalyysin perusteella. Analyysin kannalta tämä oli siis hyväksyttävä tulos ja jatkuvaan seurantaan valittiin valaistusasetukset taulukosta 2 laitteen tullessa tuotantokäyttöön. Kaikilla valaistusasetuksilla valittiin yksi harmaasävyarvo sekä RF-asetuksesta  $17 \mu\text{m}$  dimensiomittaus monitoroitavaksi. Laite otettiin valituille tuotteille tuotantokäyttöön, ja muutaman kuukauden päästä havaittiin jo hyvinkin säännöllisesti poikkeamia harmaasävyarvoissa kontrollirajoihin nähden ensimmäisen lampun käyttöiän lähes työssä loppuaan. Lisäksi tiettyjen lamppujen asennus laitteelle johti välittömästi massiiviseen tasomuutokseen punaista suodatinta käyttävässä SPC-reseptissä. Kuvassa 38 on kerätty SPC-mittausdataa kolmen kuukauden aikaväliltä, joka on yhdistetty laitteen lokitiedostoista löytyviin valoa säätelevän vaimenninsysteemin parametrioivoihin. Parametrioista on analyysin jälkeen valittu havaittujen tulosten kanssa eniten korreloivat tekijät. Kuvassa on eri ryhminä jaoteltu valokeilan intensiteettiä rajoittavan reikävaimentimen asento sekä käytetyn lampun sarjanumero. Kuvaajista nähdään selkeästi, että tulokset kvantittuvat reikävaimentimen asennon mukaan sekä siirtyvät pois stabiilista tilasta tietyllä lamppuyksilöllä. Kaikissa mittauspis-teissä laite tosin ilmoitti takaisinkytketyn intensiteetin olevan 50 %, jonka pitäisi taata tasainen vaste myös harmaasävyille. Datat perusteella voidaan siis olettaa, että takaisinkytkennässä on kaksi perustavanlaatuaista ongelmaa: lampunvaihto tuottaa merkittävän intensiteettieron punaiselle suodattimelle sekä reikävaimentimen asennot



Kuva 37: Kuvaajat Minitabin kontrollirajojen laskentaan tarkoitetusta analyysistä. Ylin kuvaa päivittäisen viiden toistetun mittauksen keskiarvoa, joiden perusteella kontrollirajat UCL ja LCL ovat laskettu SPC-seurantaa varten. Keskimmaisessa kuvaajassa näkyy poikkeama edelliseen mittaukseen nähden. Alimmassa kuvaajassa nähdään taas päivittäisen viiden toiston välistä keskinäistä vaihtelua, eli mittauksen suurimman ja pienimmän arvon välistä eroa. Vaaka-akselilla on mittauspäivä ja pystyakselilla harmaasävyarvo.

kvantittavat mitatut harmaasävyarvot kahteen selvästi eri tasoon. Tämän vuoksi laitteen tekemät kritisoinnit ovat laitteen senhetkisestä tilasta riippuvaisia, jolloin voidaan todeta ettei laite toimi riittävän stabiilisti.

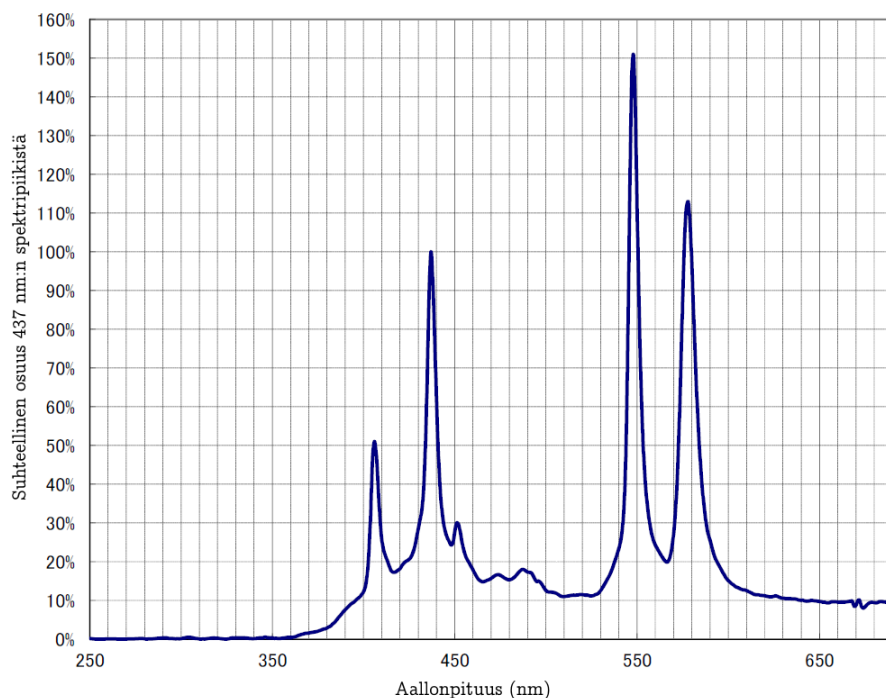
Lampun vaihdosta johtuva intensiteettimuutos liittyy niiden spektraalisiin ominaisuuksiin. Metallihalidilamppujen spektrijakauma riippuu hyvin vahvasti lampun aktiivialueen halidien konsentraatiosta. Kuten kuvasta 38a) nähdään, eri lamppujen välillä on merkittävä ero tuotetun harmaasävyyn suhteen punaista suodatinta käytettäessä. Etenkin lamppuerien välillä ero harmaasävyissä on hyvinkin merkittävä. Lamppujen vaihdosta johtuvaa eroa harmaasävyssä ei ole reseptissä, jossa valkoista valoa ei suodateta. Kuvassa 39 on esitetty CAVI:lla käytettävien metallihalidilamppujen spektri. Kuten nähdään, lamppujen spektrissä on erittäin vahvaa riippuvuutta aallonpituudesta ja voimakkaita intensiteettimaksimeja. CAVI:lla lampun tuottamaa intensiteettiä seuraavan piipohjaisen fotodiodin spektri on kohtalaisen tasainen verrattuna lampun emittoimaan spektriin, jolloin sen luoma vaste koostuu intensiteettien summasta koko spektrin ylitse. Näin ollen suhteellisen pienet muutokset intensiteettimaksimien kohdalla vaikuttavat ulostuloon, sillä fotodiodin ohjaama takaisinkytkentä on systeemissä asennettu ennen punaista suodatinta.



Kuva 38: Kuvaajia päivittäisen SPC-mittauksen tuloksista punaisella suodattimella tehdyistä mittauksista kolmen kuukauden ajalta, joissa yksi mittauspiste on viiden mittauksen keskiarvo. Molemmissa kuvaajissa on samat mittapisteet, mutta ryhmitelty väreittäin eri parametrin mukaan. Kuvaajassa a) ryhmittely on tehty lampun sarjanumeron perusteella. Kuvaajassa b) on samat mittapisteet ryhmitelty kahdeksanportaisen reikävaimentimen asennon mukaan. Vaakatasossa olevilla katkoviivoilla on piirretty suurinpiirtein kunkin rakovaimentimen asennon tuottaman vasteen keskiarvo lampulla SN 2. Stabiilin ulostulon takaamiseksi harmaasävyn tulisi pysyä noin  $\pm 3$  GV:n sisällä keskiarvosta.

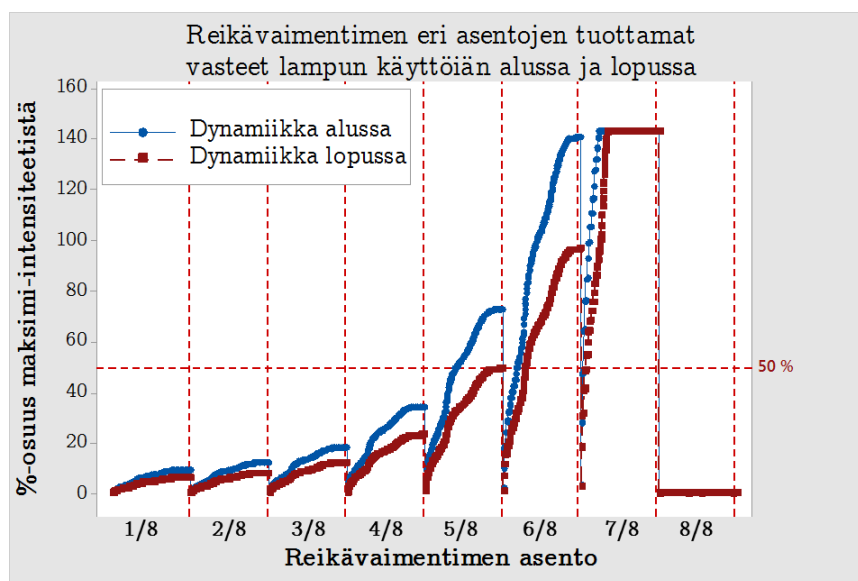
Lampun intensiteettiä automaattisesti kontrolloivan vaimenninsysteemin merkitystä saatuihin lopullisiin harmaasävyjen mittauksituloksiin analysoitiin myös tarkemmin. Systeemi pyrkii ylläpitämään näytteellä tasaista esiasetettua intensiteettiä rajoittamalla optisilla vaimentimilla lampun tuottaman valokeilan pääsyä näytteelle. Systeemi käyttää kolmea eri metodia intensiteetin säädössä: reikä- ja rakovaimenninta sekä lampun jännitteen säätöä. Näistä suurin vaikutus on reikävaimentimella ja





Kuva 39: CAVI:lla käytettävän lampun spektraalivaste. Spektrissä on havaittavissa kolme selvää piikkiä sinisen, vihreän ja keltaisen aallonpituuden alueella

pienin jännitteen säädöllä. Reikävaimentimen asennon merkitys toteutuneelle harmaasävyille nähdään kuvaajasta 38b). SPC:ssä havaittuja poikkeamia harmaasävyissä tuli yhä useammin lampun käyttöön kasvaessa yli 1000 tunnin eliniän, mutta välillä laite palasi näennäisesti stabiiliin tilaan. Prosessiparametreja ja mittaustuloksia vertailemalla syyksi paljastui reikävaimentimen asennon vaihtuminen. Syy, miksi lampun ikääntyminen aiheutti tämänkaltaista käyttäytymistä, selvitettiin lampun dynamiikkaa mallintavalla testillä, jossa laite käy läpi kaikki mahdolliset rako- ja reikävaimentimen tasot. Tulokset eräällä lampulla käyttöön alussa sekä loppuvaiheessa on esitetty kuvassa 40. Kuten kuvasta nähdään, lampun tuottama intensiteetti laskee käyttöön kasvaessa, jonka johdosta takaisinkytkennän tulee vaihtaa enemmän valoa läpäisevä reikävaimentimen asento. Ongelmasta voisi periaatteessa päästä eroon valitsemalla tavoiteintensiteetti siten, että takaisinkytkennän ei tarvitse säätää reikävaimentimen asentoa. Valitettavasti ainoa tehohäviö ei synny lampun emission laskiessa, vaan valoa ohjaava valokuitu kuluu yhtä lailla aiheuttaen intensiteetin madaltumista, mutta merkittävästi lamppeja hitaammalla tahdilla. Hypoteesi reikävaimentimen aiheuttamille poikkeamille mittaustuloksissa on se, että vaimentimen kuviointi jakaa valonsäteen pieniin nippuihin. Puoliheijastavalle peilille, jonka takana takaisinkytkentää ohjaava fotodiodei sijaitsee, saapuu tällöin epähomogeenistä valaistusta. Tällöin pienen pinta-alan omaava fotodiodei tuottaa vasteen, joka on vahvasti verrannollinen epähomogeenisen valaistuksen sijoittumiseen. Optisen kuitukaapelin on luultavasti oletettu diffuusoivan intensiteettijakauma riittävän tasaiseksi, mutta todelliset mittaustulokset osoittavat muuta.



Kuva 40: Erään lampun intensiteetin dynamiikka kaikilla takaisinkytkennän mahdollistavilla asetuksilla lampun käyttöön alussa ja lopussa. Pystyakselilla on laaduton prosenttiosuus laitteen sallimasta maksimi-intensiteettitasosta ja vaaka-akselilla reikävaimentimen asennot. Pystysuuntaisten katkoviivojen sisällä on lisäksi muuttujana 256-portaisen rakovaimentimen asento. Kuten nähdään 50 %-in asetetusta tavoitetasosta, lampun käyttöön lähestyessä loppuaan reikävaimentimen asento 5/8 kykenee juuri ja juuri saavuttamaan asetetun intensiteettitason. Takaisinkytkentä pyrkii myös käyttämään aina pienintä käytettävissä olevaa rakovaimentimen asentoa, mikä rajoittaa dynamiikkaa mutta mahdollistaa tarkemman säädön.

## 5.2 AVI:n ja CAVI:n kyvykkyysanalyysi

Laitteiden kyvykkyyttä voidaan verrata usealla eri tavalla. Näistä mainittakoon nopeus eli läpimenoaika kiekkoilla, erottelukyky, stabiilisuus, käytettävyys ja mittauksen tehokkuutta ja toistettavuutta mittaava Gage R&R-testi. Viimeksi mainittu on ehkä selkein ja numeerisin tapa toteuttaa vertailua MEMS-tarkastuksia ajatellen. Testillä tiedetään periaatteessa suoraan, miten tehokkaasti mittalaite saa viallisia tuotteita kiinni ja minkä verran se taas tuottaa vääriä hylkäyksiä. Gage-kiekolta saatu tulos on kuitenkin viitteellinen, sillä yksittäisiin mittauksiin voi vaikuttaa esimerkiksi FA:ta kasvattaen kiekolle laskeutuneet partikkelit. Lisäksi Gage-kiekoille tehtävät defektit ovat usein kertaluokkaa suurempia aitoihin tuotannossa esiintyviin defekteihin nähden. Laitteita vertailtaessa keskenään sekä pitkän ajan stabiilisuutta seurattaessa Gage-kiekoilla saadut tulokset ovat taas hyvinkin käyttökelpoisia. Taulukossa 3 on tehty vertailua edellämainitulla menetelmällä. Yleisemmällä tasolla laitteiden vertailua on tehty taulukossa 4.

Taulukko 3: CAVI:n ja AVI:n vertailu tuotekohtaisilla Gage-tuloksilla. Tuotannossa AVI-laitteita on kaksi, joiden välillä on reseptien kyvykkyuden osalta hieman eroa vaikka mittalaitteet ovat identtisiä. Tuotteen 3 tulokset ovat suuntaa antavia, sillä tarkastusresepti ei ole vielä laatuja järjestelmän ja tuotannon vaatimalla tasolla.

		AVI_1	AVI_2	CAVI
Tuote 1	Miss Rate	-	12,7 %	1,4 %
	False Alarm rate	-	2,0 %	3,7 %
Tuote 2	Miss Rate	16,6 %	9,6 %	5,1 %
	False Alarm rate	2,0 %	4,4 %	4,0 %
Tuote 3	Miss Rate	16,9 %	14,4 %	3,0 %
	False Alarm rate	2,8 %	2,8 %	10,8 %

Kaikkiaan CAVI:lla on saatu parannettua tuotelaatua pienentämällä havaitsemattomien defektien määrää. Tämä on pääosin toteutettu saannon kustannuksella väärin hälytysten kasvaessa, joka näkyy FA:n kasvuna Gage-kiekoilla. Saannon parantamisen kannalta olisi tärkeää selvittää, minkä tyyppiset defektit vaikuttavat tuotteen toimintaan sekä prosessoitavuuteen ja keskittää tarkastus näihin vikoihin. Gage-kiekon FA:n ja MR:n välillä tasapainottelu on haastavaa, eikä prosessi-insinööri voi täysin luottaa niiden tuottamaan tietoon: hyvät Gage-tulokset voivat romahduttaa saannon tuotantokiekoilla, jolloin on syytä tyytyä huonompiin Gage-kiekon tuloksiin tai mieluummin valmistuttaa uusi, tuotantolaatua paremmin vastaava referenssiekko.

Tuotteiden ylösajo CAVI:lle on aloitettu päältäkontaktoitavista tuotteista, sillä niillä reseptien tekeminen vaatii arviolta noin kymmenesosan ajasta verrattu-

na sivustakontaktoitaviin tuotteisiin. Tuotteet 1 ja 2 ovat tämän tyyppisiä ja ne ovat keskenään visuaalisesti samankaltaisia tuotteita. Molemmilla on laajat lasialueet sekä ohuita metallijohtimia, kuten kuvassa 26. CAVI:n edistyksellisemmät valaistusmenetelmät parantavat kyvykkyyttä nähdä lasilla olevia vikoja, sillä pimeäkenttäkuvantaminen on lähes ainoa keino saada riittävä kontrasti lasilla olevien defektien ja taustan välille. Lisäksi johdintarkastus molemmilla tuotteilla on huomattavasti tarkempi CAVI:lla laadukkaamman optiikan, homogeenisemmän valaistuksen ja isomman suurennoksen myötä. Tämä tuottaa huomattavan parannuksen MR-parametriin molemmilla tuotteilla. Lankabondausalueiden sekä reunamurtumien tarkastuksen osalta kyvykkyys ei juuri eroa, sillä nämä defektit ovat hyvin selkeitä ja suurikokoisia useimmissa tapauksissa. FA:n kasvu CAVI:lla tuotteella 1 johtuu muutamasta eri tekijästä: partikkeleiden laskeutumisesta tarkastusalueille, herkemästä tarkastuksesta joka paljastaa uusia, Gage-kiekoille kritisioimattomia vikoja sekä yleisesti reseptien herkkyydestä. Partikkeleita tulee väistämättä tarkastusalueille, jotka näyttävät Gage-analyysin perusteella vääriltä hälytyksiltä laskeutuessaan hyviksi luokitelluille elementeille. Tämän vuoksi Gage-kiekoja on syytä puhdistaa paineilmalla säännöllisesti sekä kritisoida uudelleen, mikäli uudet partikkelit eivät poistu puhdistusyrityksistä huolimatta. Tuotteella 2 FA on CAVI:lla vastaavalla tasolla molempiin AVI-laitteisiin verrattuna.

Sivustakontaktoitavalla tuotteella 3 FA:n huomattava kasvu AVI:in nähden johtuu lähes täysin CAVI-reseptin kyvyttömyydestä erottaa pinnankarheus ja tummentuma toisistaan, jotka ovat esitetty kuvassa 23. Saman liiallisen herkkyyden ansiosta MR on laskenut merkittävästi. FA:ta voidaan luultavimmin parantaa optimoimalla reseptin ohjelmallisia suodatuksia sekä lisäämällä AND- ja OR-logiikkaa eri valaistusasetusten tuottamille mittaustuloksille. CAVI:n ollessa tuotantokäytössä tuotteilla 1 ja 2 havaittiin stabiilisuusongelmia valonlähteen kanssa ja tämän ongelman selvitys priorisoitui korkeammalle tasolle verrattuna tarkastusreseptin kehitykseen tuotteelle 3. Tämän tuotteen vaatimat tarkastukset ovat senkaltaisia että niiden hienosäätö vaatii hyvin paljon aikaa jonka lisäksi tarkastukset ovat hyvin herkkiä valotason muutoksille. Kokonaisuuden kannalta laitteen stabiilisuutta on parannettava ja tähän esitetään jatkotoimenpide-ehdotuksia seuraavassa kappaleessa.

Taulukko 4: CAVI:n ja AVI:n vertailu merkittävien ominaisuuksien osalta.

Ominaisuus	AVI 1/2	CAVI
Nopeus (kiekkoa tunnissa, riippuu vahvasti tarkastuksista)	2-5	9-25
Suurennokset	2.5x	2.5x ja 5x (25x ja 50x mahdollisia)
Valaistusasetukset	Koaksiaalivalaistus (kirkas LED), ympyrävalaistus (IR) ja taustavalistus	Koaksiaalivalaistus (punaisella suodattimella tai ilman), RGB-LED ympyrävalaistus, pimeäkenttä-kuvantaminen
Kiekkojen käsittely	Täysin manuaalinen	Automaattinen
Kiekkojen suojaus ESD:ltä	Alapuolinen ionisointi automaattinen, yläpuolinen manuaalinen	Täysin automatisoitu, ei operaattoriperäistä ESD-riskiä
Vikakuvien ja kiekkokarttojen tutkiminen	Ei mahdollista laitteella, kiekkokarttojen käsittely tuotantokannassa josta ei ole linkkiä elementtikuviin	Tuloksien analysointi välittömästi ja erilaiset analyysimenetelmät mahdollisia
Kuvankäsittelymetodit	Suuri määrä Matrox-kirjaston funktioita	Vähäisesti kuvankäsittelymahdollisuuksia, mutta laitteella laajat referenssimahdollisuudet
Defektien erotus	Staattinen, tutkittavan pinnan oletetaan pysyvän homogeenisenä kiekkojen välillä	Mahdollisuus dynaamisesti muuttuviin kritisointeihin
Tarkastusreseptien teko	Epäintuitiivista, vaivalloista ja hidasta	Erittäin nopeaa, intuitiivista, ohjelma ohjaa asetuksesta toiseen. Helppokäyttöinen, mutta rajoitettu ohjelmisto
Kiekkojen kohdistus	Operaattorit osoittavat laitteelle ensimmäisen elementin kiekolta, jonka jälkeen laite tarkastaa automaattisesti kiekon kohdistuksen	Kiekon kohdistaminen ja elementtien haku automaattista

## 6 Yhteenveto ja jatkotoimenpiteet

Tässä opinnäytetyössä on vertailtu MFI:n tuotantoympäristössä olevien vanhan sukupolven AVI-laitteiden ja uuden sukupolven CAVI-laitteen käytettävyyttä, stabiilisuutta ja soveltuvuutta liikeanturien automaattiseen kritisointiin. Työssä havaittiin CAVI:n käytettävyyden ja tehokkuuden tarkastusreseptien luomisessa olevan omaa luokkaansa, mutta laitteen valonlähteen stabiilisuuden todettiin olevan puutteellinen. CAVI:n käyttöliittymä on selkeä ja säädettäviä asetuksia on hyvin paljon, kuitenkin ruuhkauttamatta käyttäjärajapintaa turhaan. Tämän johdosta laiteinsinöörit voivat käyttää reseptien tekemiseen varatun ajan huomattavan paljon tehokkaammin verrattuna vanhempiin AVI-järjestelmiin. Erityisesti dynaamisesti muuttuvat defektien hakualueet ja defektien luokittelu kontrastin perusteella ovat hyvin mainittava lisäys staattisesti asetettaviin rajoihin nähden. Kehittyneempi optiikka ja kuvausteknologia CAVI:lla kasvattavat resoluutiota sekä sen tuottamat kuvat ovat lähestulkoon vapaita häiriöistä. AVI:in verrattuna tarkastusta on saatu automatisoitua esimerkiksi kiekkojen latauksen ja purkamisen osalta, mikä vapauttaa operaattoreiden resursseja sekä pienentää käsittelyvirheiden määrää. CAVI:lle voidaan asettaa tuotantokontroleista erillisiä asetuksia, joiden avulla saadaan pysäytettyä normaalista poikkeavat kiekot. AVI:in nähden huomattava lisäys on tulosten analysointiin tarkoitettu ohjelmisto, joka yhdistää mittausdatan elementtien kuviin, joihin on korostettu löydetty defektit. Tämä nopeuttaa merkittävästi pysäytettyjen kiekkojen tutkimista, kun prosessi-insinööri saa yhden sovelluksen kautta yhdistettyä analysoitavat tulokset vikakuviin. Nämä kaikki tekijät yhdessä säästävät sekä operaattoreiden että insinöörien resursseja, lyhentävät kiekkojen prosessointiaikaa ja parantavat visuaalisen tarkastuksen laatua. Vanhat AVI:t ovat lisäksi vanhentunutta teknologiaa, joten niiden käyttöikä alkaa olla loppuvaiheessa.

CAVI:lle toteutetaan tällä hetkellä SPC-monitorointia AIAG:n ohjeiden mukaisesti, päivittäisellä operaattorivetoisella testiajolla, jossa mitataan harmaasävyjä sekä dimensiomittauksia referenssiosasta. Tätä seurantaa olisi syytä jatkokehittää siten, että dataa kerättäisiin jokaisen kiekkoajon aikana. Tällöin saataisiin jatkuvaa kontrollidataa, josta seuraisi kaksi selvää etua:

1. Monitoroinnin automatisointi
  - (a) Operaattoriperäiset virheet poistuisivat
  - (b) Kerättävien parametrien määrä voidaan moninkertaistaa
  - (c) Operaattoreiden resurssit vapautuvat muihin tehtäviin
  - (d) Mittausdatan ohella saadaan kerättyä prosessidataa, jolloin ymmärrys prosessista kasvaa
2. Reaaliaikainen seuranta kiekkotasolla
  - (a) Poikkeamiin voidaan reagoida välittömästi pysäyttämälle kiekot, joiden tarkastuksen aikana laitteen stabiilisuudessa on havaittu ongelmia

- (b) Prossesidataa saadaan jatkuvasti, jolloin laiteongelmiin voidaan reagoida ennaltaehkäisevästi

Mittasysteemin analyysin jälkeisessä tuotantokäytössä havaittiin, että laite ei toiminut riittävän stabiilisti. Ongelmien ratkaisemiseksi laitteen valmistaja suositteli käyttämään ennen kiekon skannausta tapahtuvaa harmaasävyjakauman skaalausta, eli valotason optimointia ylimääräisen ohjelmallisen vahvistuksen ja kompensaaation avulla haluttuun tasoon. Tämä suositus on ongelmallinen, sillä ehdotettu menetelmä toimii kohtuullisen hyvin joillakin tuotteilla ja valoasetuksilla, kun taas toisilla kombinaatioilla ei lainkaan, johtuen tuotteiden harmaasävyjakaumien eroista. Tästä syystä toimivien optimointiasetusten löytäminen on hyvin haastavaa ja vie paljon aikaa. Lisäksi ehdotettu menetelmä on kyseenalainen käytettävän referenssin, eli prosessoitavan kiekon vuoksi. MFI:n tuotteista suurin osa kulkee tarkastusvaiheessa sahausteipillä, josta voi olla poistettuna aiemmista prosessivaiheista johtuvien virheiden vuoksi osa elementeistä. Jos poistetut elementit sijaitsevat siellä, mistä referenssiä käydään mittaamassa, kompensatio epäonnistuu tai tuottaa hyvin arvaamattoman lopputuloksen. Lisäksi tämä menetelmä saattaa peittää poikkeaman, kuten laajamittaisen kontaminaation, jossa koko kiekon pinnan rakenne ja heijastavuus on jostain syystä muuttunut.

Laitteen stabiilin tuotantokäytön kannalta on välttämätöntä poistaa mittauksiin vaikuttavat erityisyyt. Laitteen ohjelmistossa olevaa valotason optimointia tulee jatkotutkia, sillä muut mittalaitteeseen tehtävät laajemmat muutokset ovat usein kalliita ja riskialttiita. Perustuen tässä työssä tehtyihin havaintoihin, valotason optimoinnin hyödyntämiselle MFI:llä ehdotetaan seuraavaa:

1. Valaistuksen opetus toteutettaisiin *referenssiosalla*
  - (a) Takaisinkytkentä siirtyisi CCD-kennolle, jolloin kompensoidaan lopullista valaistuksen intensiteettiä
  - (b) Erityisyyden tuottama vaihtelu poistuu
2. Referenssiosan optisten ominaisuuksien tulee vastata tuotantomateriaaleja
  - (a) Koaksiaalivalaistuksen intensiteetin optimoimiseen peilaava pii-kiekko
  - (b) Pimeäkentän kalibrointiin kaupallinen optinen referenssi, joka on sirottava ja omaa sopivan heijastavuuskertoimen

Referenssiosien materiaali ja pinnan ominaisuudet tulee miettiä siten, että ne tuottavat tuotantoreseptien valaistusasetuksilla vasteen, joka asettuu harmaasävyissä välille  $0 < x < 255$ , kuitenkin saturoitumatta kumpaankaan ääritasoon. Tämä johtuu siitä, että automaattinen valotason optimointi integroi pikselihistogrammia, jolloin saturoituneista pikseleistä ei voida saada optimointiin tarvittavaa informaatiota. Valotason optimointi toteutetaan ohjelmallisesti määrittämällä ylempi raja harmaasävyarvolle. Sen lisäksi määritellään, kuinka suuri osa kaikista pikseleistä

tulee olla edellä mainittua raja-arvoa suurempia itseisarvoltaan. Vastaava toteutetaan alarajalla, ja näiden kahden rajan yhdistelmällä voidaan säätää vahvistusta sekä kompensatiota halutun histogrammin tuottamiseksi. Menetelmä on hyvin herkkä referenssin suhteen, sillä hyvän toistettavuuden saavuttamiseksi histogrammin keräämät datapisteet tulee kerätä aina samasta paikasta. Referenssiosa vaatii siis toimiakseen optimaalisesti kahta eri heijastuskerrointa omaavaa materiaalia vierekkäin. Yhden rajapinnan systeemillä on tosin se riski, että kuvanotto siirtyy raja-alueelta sivummaksi, jolloin tumma ja valkoinen alue eivät ole tasapainossa, vaikuttaen siten valotason tasapainotukseen. Tämä ongelma saadaan poistettua työstämällä sen kaltaisen referenssiosa, jossa eri heijastavuuden omaavat alueet ovat ohuina kaistaleina toistettuna koko referenssiosan lävitse. Yhtä suurennosta käyttävässä systeemissä riittäisi tehdä kaksi tummaa ja kaksi vaaleaa kaistaletta, jotka mitoitetaan kattamaan tarkasti koko linssin kuvantamisalue. Tällöin y- tai x-suuntainen virhe ei vaikuta muodostuvaan histogrammiin, olettaen että kuvantaminen pysyy referenssialueella. Koska systeemi käyttää kahta eri linssiä joilla molemmilla on erikokoinen kuvantamisalue, tulee niille tehdä omat yksilöllisesti mitoitettut referenssiosat.

Toinen tarkempaa tutkimusta vaativa tekijä on selvittää sopivat referenssimateriaalit. Koaksiaalivalaistusta käyttävien valaistusasetusten optimointiin tarvitaan peilimäisesti heijastava pinta, sillä hienohiottu pii ja sen päällä oleva metalli sirottavat suhteellisen vähän. Tällöin ohuealla oksidikerroksella varustettu piikiekko tai alumiinilla sputteroitu piikiekko kelpaisi tähän tarkoitukseen. Pimeäkenttä- ja RGB-asetuksia käytettäessä taas tulisi soveltaa Lambertian-sirottavia referenssejä, sillä näillä valaistusasetuksilla tutkittavien elementtien tausta on hyvin tumma ja poikkeamat näkyvät saturoituneina, johtuen elementtien pintojen vähäisestä siroinnasta. Alustavien testien perusteella CAVI:lla 92 %:n heijastavuuden omaavat Lambertian-sirottavat näytteet saturoivat koko kennon, ja 30 %:n heijastuskertoimen omaava näyte osui suurin piirtein dynaamisen alueen keskelle harmaasävyasteikolla, kun käytettiin tuotannossa olevia RGB- ja pimeäkenttäasetuksia. Vaihtoehtoja on siis helposti saatavilla, joten seuraavaksi tulisi selvittää tähän sovellukseen optimaaliset ja optisesti stabiilit materiaalit.

Tämän työn puitteissa on esitetty jatkotoimenpiteet stabiilisuuden saattamiseksi riittävälle tasolle. Referenssiosan spesifikaation laatiminen on työn alla ja stabiilisuutta parantavat toimenpiteet tullaan implementoimaan diplomityön jälkeen laitevalmistajan kanssa yhteistyössä.



## Viitteet

- [1] Elias N Malamas, Euripides GM Petrakis, Michalis Zervakis, Laurent Petit, and Jean-Didier Legat. A survey on industrial vision systems, applications and tools. *Image and vision computing*, 21(2):171–188, 2003.
- [2] Timothy S Newman and Anil K Jain. A survey of automated visual inspection. *Computer vision and image understanding*, 61(2):231–262, 1995.
- [3] Szu-Hao, Hang and Ying-Cheng, Pan. Automated visual inspection in the semiconductor industry: A survey. *Computers in Industry*, pages 1–10, 2015.
- [4] Automotive Industry Action Group. *Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)*. AIAG, 2008.
- [5] Hartzell Allyson, Silva Mark, and Shea Herbert. *MEMS Reliability*. Springer, 2010.
- [6] Automotive Industry Action Group. *Measurement Systems Analysis (MSA)*. AIAG, 2010.
- [7] Jonathan N Tinsley, Maxim I Molodtsov, Robert Prevedel, David Wartmann, Jofre Espigulé-Pons, Mattias Lauwers, and Alipasha Vaziri. Direct detection of a single photon by humans. *Nature Communications*, 7, Online, 2016. Lainattu: 12.2.2017.
- [8] Batchelor, Bruce G. *Machine Vision Handbook*. Springer, London, 1 edition, 2014.
- [9] Ariel Lipson, Stephen G Lipson, and Henry Lipson. *Optical physics*. Cambridge University Press, 2010.
- [10] Max Born and Emil Wolf. *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*, volume 7th Edition. Elsevier, 1999.
- [11] Gerald C Holst and Terrence S Lomheim. *CMOS/CCD sensors and camera systems*, volume 408. JCD Publishing USA, 2007.
- [12] Spiros Kitsinelis and Spyridon Kitsinelis. *Light Sources: Basics of Lighting Technologies and Applications*. CRC Press, 2015.
- [13] Moritex. IR-MEMS Inspector. [http://moritex.com/products/mv/inspection\\_systems/5-1-1.html](http://moritex.com/products/mv/inspection_systems/5-1-1.html), 2015. Lainattu: 7.10.2016.
- [14] Stemmer Imaging. Illumination techniques for industrial image processing. <http://www.stemmer-imaging.co.uk/en/technical-tips/illumination-techniques/>, 2008. Lainattu: 11.12.2016.

- [15] Vernon David. Machine vision automated visual inspection and robot vision, 1991.
- [16] Xing-Fei He and Nixon O. Time delay integration speeds up imaging. *Photonics Spectra*, 46(5):50, 2012.
- [17] Jim R Parker. *Algorithms for image processing and computer vision*. John Wiley & Sons, 2010.
- [18] D-M Tsai, S-T Chuang, and Y-H Tseng. One-dimensional-based automatic defect inspection of multiple patterned TFT-LCD panels using Fourier image reconstruction. *International journal of production research*, 45(6):1297–1321, 2007.
- [19] Kazuhiro Yoshida. Murata combines precision, reliability in MEMS sensor. <http://www.murata.com/~media/webrenewal/about/newsroom/tech/sensor/mems/ta1292.ashx?la=en-gb>, 2012. Lainattu: 2.1.2017.
- [20] Murata Electronics Oy. 3D MEMS. <http://www.murata.com/en-us/products/sensor/accel/techguide/3dmems>, 2016. Lainattu: 2.1.2017.
- [21] Mikko Saukoski, Lasse Aaltonen, and Kari AI Halonen. Zero-rate output and quadrature compensation in vibratory mems gyroscopes. *IEEE Sensors Journal*, 7(12):1639–1652, 2007.
- [22] Heikki Kuisma, Tapani Ryhänen, Juha Lahdenperä, Eero Punkka, Sami Ruotsalainen, Teuvo Sillanpää, and Heikki Seppä. A bulk micromachined silicon angular rate sensor. In *Solid State Sensors and Actuators, 1997. TRANSDUCERS'97 Chicago., 1997 International Conference on*, volume 2, pages 875–878. IEEE, 1997.
- [23] Codico. Murata: 3D MEMS. <https://www.codico.com/en/News/MURATA-3D-MEMS-2014-04-29.htm>, 2014. Lainattu: 4.1.2017.
- [24] VP Ganesh and Charles Lee. Overview and emerging challenges in mechanical dicing of silicon wafers. In *2006 8th Electronics Packaging Technology Conference*, 2006.
- [25] Markku Tilli, Teruaki Motooka, Veli-Matti Airaksinen, Sami Franssila, Mervi Paulasto-Kröckel, and Veikko Lindroos. *Handbook of silicon based MEMS materials and technologies*. William Andrew, 2015.
- [26] Donald M Mattox. *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing*. William Andrew, 2010.
- [27] Ossila. Evaporation Stack for Long Channel OFETs. <https://www.ossila.com/products/ofet-evaporation-stack-long-channel>, 2017. Lainattu: 1.2.2017.
- [28] Chauhan Preeti, Choubey Anupam, Zhong ZhaoWe, and Pecht Michael. *Copper Wire Bonding*. Springer, New York, USA, 1 edition, 2014.

- [29] Automotive Industry Action Group. *Statistical Process Control (SPC)*. AIAG, 1995.
- [30] John S Oakland. *Statistical process control*. Butterworth-Heinemann, 2003.